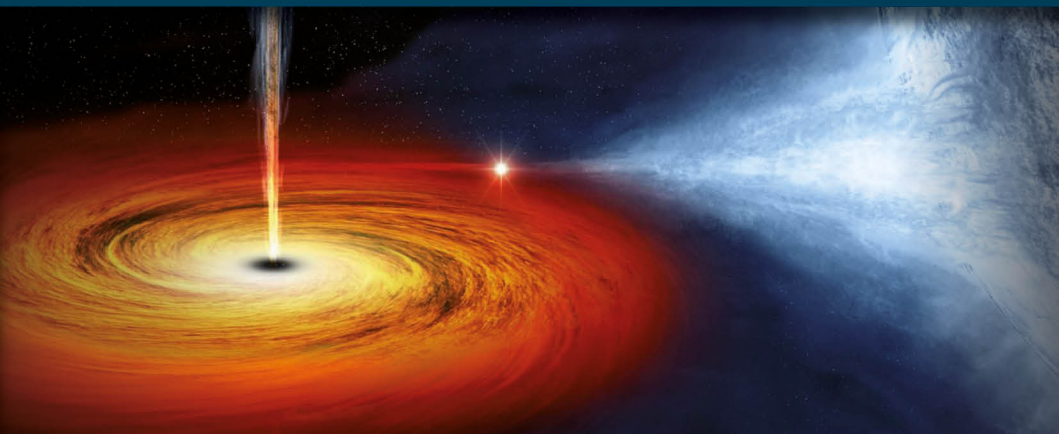
OBLÒ CASTELVECCHI

Kip
Thorne

PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2017

Buchi neri e salti temporali

L'eredità di Einstein

Prefazione di **Stephen Hawking**

Oblò

Kip Thorne

BUCHI NERI E SALTI TEMPORALI

L'eredità di Einstein

Prefazione di Stephen Hawking

Traduzione di David Santoro

Questo libro è dedicato a
John Archibald Wheeler,
mio mentore e amico

PREFAZIONE
di Stephen Hawking

Questo libro tratta di una rivoluzione della nostra concezione dello spazio e del tempo, e delle sue notevoli conseguenze, alcune delle quali devono ancora essere chiarite. È anche il racconto affascinante, scritto da una persona direttamente coinvolta, degli sforzi compiuti e dei successi ottenuti nel tentativo di comprendere quelli che sono probabilmente gli oggetti più misteriosi dell'Universo, i buchi neri.

Una volta si riteneva ovvio che la superficie della Terra fosse piatta: essa era infinita o delimitata da un margine oltre il quale si poteva cadere, se si fosse stati tanto sciocchi da spingersi troppo in là. Il ritorno di Magellano e di altri che viaggiarono attorno al mondo convinse infine l'opinione pubblica che la superficie terrestre si curvava su se stessa come una sfera, ma si dava ancora per scontato che questa sfera esistesse in uno spazio piatto, nel senso che obbediva alle regole della geometria di Euclide: le linee parallele non si incontrano mai. Tuttavia, nel 1915 Einstein propose una teoria che combinava lo spazio e il tempo in qualcosa chiamato spaziotempo. Esso non era piatto, ma curvo o deformato dalla materia e dall'energia in esso presenti. Poiché lo spaziotempo è molto prossimo a essere piatto nelle nostre vicinanze, questa curvatura comporta ben poche differenze in situazioni normali. Ma le implicazioni per le zone più distanti dell'Universo erano perfino più sorprendenti di quanto Einstein avesse immaginato. Una di queste era la possibilità che le stelle collassassero per effetto della loro stessa gravità fino a che lo spazio attorno ad esse non diventava talmente curvo da isolarle dal resto dell'Universo. Einstein stesso non credeva che tale collasso potesse avvenire, ma molti altri studiosi dimostrarono che era una conseguenza inevitabile della sua teoria.

La storia di come essi vi siano riusciti e di come abbiano scoperto le singolari proprietà dei buchi neri che restavano nello spazio è il tema di questo

libro. È una storia della scoperta scientifica in atto scritta da uno di coloro che vi prendono parte, un po' come *La doppia elica* di James Watson lo è stato riguardo alla scoperta della struttura del DNA che ha portato alla conoscenza del codice genetico. Ma a differenza del caso del DNA, non vi erano dati sperimentali che potessero guidare i ricercatori. Al contrario, la teoria dei buchi neri è stata elaborata prima che le osservazioni fornissero un'indicazione della loro effettiva esistenza. Non conosco nessun altro esempio nella scienza in cui una simile estrapolazione sia stata effettuata con successo unicamente sulla base del pensiero. Ciò dimostra la grande autorevolezza e profondità della teoria di Einstein.

C'è molto che ancora non sappiamo, come ad esempio cosa accade agli oggetti e alle informazioni che cadono in un buco nero. Riemergono da qualche parte nell'Universo, o in un altro universo? E possiamo deformare lo spazio e il tempo così tanto da viaggiare indietro nel tempo? Queste domande fanno parte del nostro attuale cammino verso la comprensione dell'Universo. Forse qualcuno tornerà indietro dal futuro e ci darà le risposte.

INTRODUZIONE
di Frederick Seitz

Questo libro si basa su una combinazione di princìpi fisici ben consolidati e di congetture molto fantasiose, in cui l'autore cerca di spingersi oltre quanto attualmente si sa con certezza e di proiettare i propri pensieri in una parte del mondo fisico che non ha un corrispettivo conosciuto nella nostra vita quotidiana sulla Terra. Il suo obiettivo è, tra l'altro, di esaminare sia l'esterno che l'interno di un buco nero, un oggetto astronomico talmente massiccio e concentrato che il suo campo gravitazionale impedisce alle particelle di materia e alla luce di fuoriuscirne nei modi comuni a una stella come il nostro Sole. Le descrizioni degli eventi che si verificherebbero se un osservatore si avvicinasse troppo a un buco nero dall'esterno si basano sulle previsioni della teoria generale della relatività in una realtà caratterizzata da una «forte gravità», una condizione nella quale non è ancora mai stata sottoposta a verifica. Le ipotesi che si spingono oltre e si occupano della regione interna detta «orizzonte» del buco nero si basano su una forma speciale di coraggio, anzi, di vera e propria audacia, che Thorne e i suoi colleghi internazionali possiedono in abbondanza e condividono con gran piacere. Viene in mente la battuta di un eminente fisico il quale diceva che «i cosmologi sbagliano spesso ma dubitano raramente». Questo libro andrebbe letto con due obiettivi: apprendere dei dati concreti su alcune strane ma reali caratteristiche del nostro Universo fisico e apprezzare le fondate congetture su ciò che potrebbe esserci al di là di quanto sappiamo con ragionevole certezza.

Come premessa all'opera, va detto che la teoria della relatività generale di Einstein, una delle più grandi creazioni della scienza teorica, è stata formulata poco più di tre quarti di secolo fa. Ai trionfi da essa segnati nei primi anni Venti con la spiegazione delle deviazioni del moto di Mercurio dalle previsioni della teoria newtoniana della gravitazione e, successivamente, dello spostamento verso il rosso delle lontane nebulose scoperte da Hubble e dai suoi

colleghi presso l'osservatorio di Mount Wilson, è seguito un periodo di relativa calma, mentre la comunità dei fisici rivolgeva gran parte della sua attenzione all'impiego della meccanica quantistica, nonché alla fisica nucleare, alla fisica delle particelle ad alta energia e ai progressi nella cosmologia osservativa.

Il concetto di buchi neri era stato avanzato come ipotesi teorica subito dopo la scoperta della teoria gravitazionale di Newton. Con le opportune modifiche, esso rientrava a pieno diritto nella teoria della relatività, se si era disposti a estrapolare le soluzioni delle equazioni fondamentali relative a campi gravitazionali così forti, una procedura cui Einstein all'epoca guardava con diffidenza. Tuttavia, applicando la teoria, Chandrasekhar osservò nel 1930 che in base a essa le stelle dotate di una massa superiore a un valore critico, il cosiddetto limite di Chandrasekhar, dovrebbero collassare per trasformarsi in ciò che noi ora chiamiamo buchi neri, una volta esaurite le fonti nucleari di energia responsabili delle loro elevate temperature. Nel corso degli anni Trenta questo studio è stato esteso da Zwicky e da Oppenheimer e i suoi colleghi, che hanno dimostrato che vi è una fascia di valori della massa stellare entro la quale ci si può aspettare che la stella collassi invece in uno stato in cui consiste in neutroni densamente compressi; si tratta delle cosiddette stelle di neutroni. In entrambi i casi, l'implosione finale della stella una volta esaurita la sua energia nucleare dovrebbe accompagnarsi a un'immensa emissione di energia in un tempo relativamente breve, dispersione associata alla lucentezza delle supernovae occasionalmente osservate nella nostra galassia oltre che in nebulose più distanti.

La Seconda Guerra Mondiale portò a un'interruzione delle ricerche in questo campo. Tuttavia, negli anni Cinquanta e Sessanta, la comunità scientifica vi è ritornata con interesse e slancio rinnovati sia sul piano sperimentale che su quello teorico. Tre furono i principali progressi conseguiti. Primo, le conoscenze ottenute grazie alla ricerca nel campo della fisica nucleare e delle alte energie trovarono naturalmente posto nella teoria cosmologica, offrendo sostegno a quella che attualmente è di solito chiamata la teoria del «Big Bang» sulla formazione dell'Universo. Molte prove rafforzano l'ipotesi secondo cui l'Universo così come lo conosciamo sia nato in conseguenza dell'espansione di un piccolo brodo primordiale di particelle strettamente compresse e a un'elevata temperatura, comunemente definito come una palla di fuoco. L'evento iniziale sarebbe avvenuto in un momento compreso tra dieci e venti miliardi di anni fa. Forse la prova più significativa a sostegno di questa ipotesi è stata la scoperta dei residui degradati delle onde luminose che hanno accompagnato una fase successiva dell'esplosione iniziale.

Secondo, le stelle di neutroni previste da Zwicky e dall'équipe di Oppenheimer sono state effettivamente osservate e si comportavano ampiamente in accordo con le previsioni della teoria, conferendo piena credibilità all'idea che le supernovae siano associate a stelle che hanno subìto quello che potremmo definire un collasso gravitazionale definitivo. Se possono esistere stelle di neutroni in corrispondenza di un determinato ventaglio di valori della massa stellare, non è irragionevole concludere che i buchi neri verranno prodotti dalle stelle più massive, posto che gran parte delle prove basate sull'osservazione saranno indirette. In effetti, attualmente disponiamo di molte di queste prove indirette.

Infine, diverse linee di evidenza hanno ulteriormente confermato la validità della teoria generale della relatività. Esse comprendono misurazioni ad alta precisione delle orbite satellitari e planetarie nel nostro Sistema Solare, e le osservazioni dell'azione di «lente gravitazionale» esercitata da alcune galassie sulla luce che ci arriva da fonti più lontane di queste ultime. Inoltre, in tempi più recenti, sono emerse prove convincenti della perdita di energia del moto di stelle binarie massive dalle orbite mutualmente connesse a seguito della generazione di onde gravitazionali, una delle principali previsioni della teoria. Queste osservazioni incoraggiano a credere nelle previsioni non sottoposte a verifica della teoria della relatività generale in prossimità di un buco nero e aprono la strada a ulteriori speculazioni del tipo qui esposto.

Molti anni fa il Commonwealth Fund decise, su suggerimento del suo presidente Margareth E. Mahoney, di sponsorizzare un progetto editoriale in cui eminenti scienziati venivano invitati a scrivere sul loro lavoro per un pubblico non specializzato. Il professor Thorne è uno di essi e il Book Program è lieto di presentare come nona pubblicazione il suo libro.

Il comitato consultivo del Commonwealth Fund Book Program, che ha raccomandato la sponsorizzazione di questo libro, era costituito dai seguenti membri: Lewis Thomas, M.D., direttore; Alexander G. Bearn, M.D., vicedirettore; Lynn Margulis, Ph.D., Maclyn McCarty, M.D.; Lady Medawar; Berton Roueché; Frederick Seitz, Ph.D.; e Otto Westphal, M.D. L'editore è rappresentato da Edwin Barber, vicepresidente e editor presso la W.W. Norton & Company, Inc.

PREMESSA

Di cosa tratta il presente libro
e come leggerlo

Per trent'anni ho preso parte a una grande ricerca: una ricerca volta a comprendere l'eredità lasciata da Albert Einstein alle generazioni future, la teoria della relatività e le sue previsioni sull'Universo, e a scoprire dove e in che modo la relatività non funzioni e cosa ne prenda il posto.

Questa ricerca mi ha condotto attraverso labirinti di oggetti esotici: buchi neri, nane bianche, stelle di neutroni, singolarità, onde gravitazionali, cunicoli temporali, deformazioni temporali e macchine del tempo. Mi ha insegnato l'epistemologia: cosa rende «buona» una teoria? Quali princìpi trascendenti governano le leggi di natura? Perché noi fisici pensiamo di sapere le cose che pensiamo di sapere anche quando la tecnologia è troppo debole per verificare le nostre previsioni? La ricerca mi ha fatto vedere in che modo lavorano le menti degli scienziati e le enormi differenze che esistono tra una mente e l'altra (ad esempio tra quella di Stephen Hawking e la mia) e perché occorrano molti tipi diversi di scienziati per dare sostanza alla nostra comprensione dell'Universo. La nostra ricerca, con le sue centinaia di partecipanti sparsi in tutto il mondo, mi ha aiutato ad apprezzare il carattere internazionale della scienza, i diversi modi in cui l'impresa scientifica è organizzata in società diverse e l'interconnessione della scienza con le tendenze politiche, specialmente per quanto riguarda la rivalità tra sovietici e americani.

Questo libro è un tentativo di condividere queste informazioni e intuizioni con coloro che non sono scienziati e con gli scienziati che lavorano in campi diversi dal mio. È un libro che tratta temi interconnessi tra loro e uniti da una storia comune: la storia della nostra battaglia per decifrare l'eredità di Einstein, per scoprire le sue previsioni apparentemente bizzarre sui buchi neri, le singolarità, le onde gravitazionali, i cunicoli temporali e le deformazioni temporali.

Il libro inizia con un prologo, un racconto di fantascienza che introduce

rapidamente il lettore ai concetti della fisica e dell'astrofisica che vi sono contenuti. Alcuni lettori potrebbero trovarlo scoraggiante. I concetti (i buchi e i loro orizzonti, i cunicoli temporali, le forze di marea, le singolarità, le onde gravitazionali) scorrono troppo velocemente e con poche spiegazioni. Un consiglio: sorvolate, godetevi il racconto, fatevi un'impressione generale. Ogni concetto verrà introdotto nuovamente, in modo più confortevole, nel corpo del libro. Una volta che lo avrete letto, tornate al prologo e apprezzatene le sfumature tecniche.

Il testo vero e proprio (i capitoli da I a XIV) ha un sapore completamente diverso da quello del prologo. Il filo principale che lo attraversa è quello storico, e con questo filo sono intrecciati gli altri temi del libro. Seguo il filo storico per qualche pagina, poi me ne allontano per affrontare un tema particolare, e poi un altro; poi torno alla storia per un po' e mi lancio di nuovo lungo un'altra tangente. Queste diramazioni, questo lanciarsi e altalenare offre al lettore un elegante arazzo di idee interconnesse provenienti dalla fisica, dall'astronomia, dalla filosofia della scienza, dalla sociologia della scienza, e dalla scienza nella scena politica.

La fisica può risultare ardua in taluni punti. Per facilitarne la comprensione, in fondo al libro è riportato un glossario di termini della fisica.

La scienza è un'impresa comunitaria. Le intuizioni che informano la nostra visione dell'Universo non vengono da una sola persona né da un pugno di individui, ma dagli sforzi combinati di molti di essi. Perciò in questo libro vi sono molti personaggi. Per aiutare il lettore a ricordare quelli che ricorrono più volte, vi è un elenco con qualche cenno su ognuno di essi in fondo al libro, nel capitolo dedicato per l'appunto ai «Personaggi».

Nella ricerca scientifica, come nella vita, molti temi vengono seguiti simultaneamente da persone diverse e le intuizioni di un'epoca possono avere origine in idee vecchie di decenni, ma che sono state ignorate nel periodo intercorso. Per renderne adeguatamente conto, il libro salta indietro e avanti nel tempo, soffermandosi sugli anni Sessanta per un po' e facendo poi un tuffo negli anni Trenta, per poi riprendere un filo principale negli anni Settanta. I lettori che dovessero sentirsi disorientati da tutti questi viaggi nel tempo possono aiutarsi con la cronologia riportata in fondo al libro.

Non aspiro a raggiungere i livelli di completezza, precisione e imparzialità di uno storico. Se puntassi alla completezza, la maggior parte dei lettori si perderebbe esausta per strada, come capiterebbe anche a me. Se ricercassi una maggiore precisione, il libro sarebbe pieno di equazioni che lo renderebbero talmente tecnico da essere illeggibile. Sebbene abbia cercato di es-

sere imparziale, non vi sono certamente riuscito; sono troppo vicino alla mia materia: sono stato coinvolto personalmente nei suoi sviluppi dai primi anni Sessanta a oggi, e molti dei miei amici più stretti lo sono stati a partire dagli anni Trenta. Ho cercato di riequilibrare i miei pregiudizi ricorrendo ad ampie interviste con altri partecipanti alla ricerca (si veda la Bibliografia) ed eliminandone alcuni da qualche capitolo (si vedano i Ringraziamenti). Tuttavia, alcuni pregiudizi sono ugualmente presenti.

Per venire in aiuto al lettore desideroso di maggiore completezza, precisione e imparzialità, ho elencato nelle Note di approfondimento in fondo al libro le fonti di molte delle affermazioni storiche che vi sono contenute e i riferimenti ad alcuni degli articoli tecnici originari che i partecipanti alla ricerca hanno scritto per spiegarsi a vicenda le loro scoperte. Esse riportano inoltre discussioni più precise (e quindi più tecniche) su alcuni aspetti che nel testo sono stati deformati dal mio tentativo di semplificazione.

La memoria è fallace, persone diverse che vivono gli stessi avvenimenti possono interpretarli e ricordarli in modi molto diversi. Ho relegato queste differenze nelle note. Nel testo ho affermato la mia visione definitiva delle cose, come fosse il Vangelo. Possano i veri storici perdonarmi e i non storici essermi grati.

John Wheeler, il mio principale mentore e insegnante negli anni della mia formazione come fisico (e uno dei personaggi centrali di questo libro), si diverte a chiedere agli amici: «Qual è la singola cosa più importante che hai imparato in questo modo?». Poche domande focalizzano la mente in modo più chiaro. Nello spirito della domanda di John mi chiedo, dopo quindici anni passati a scrivere e cancellare (più spesso a cancellare): «Qual è la singola cosa più importante che vorresti che i tuoi lettori imparassero?».

La mia risposta è: la sorprendente capacità della mente umana di sondare – tra sbalzi, vicoli ciechi e sforzi di comprensione – le complessità del nostro Universo e di rivelare l'intima semplicità, l'eleganza e la meravigliosa bellezza delle leggi fondamentali che lo governano.

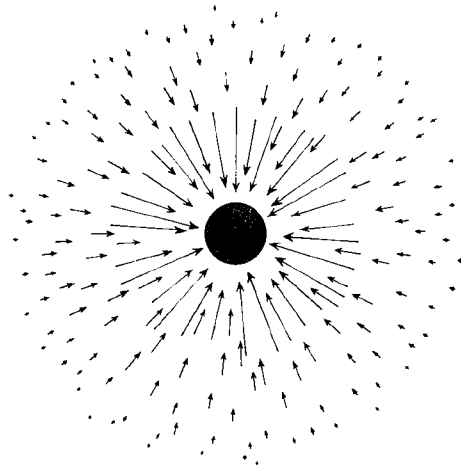
PROLOGO: UN VIAGGIO TRA I BUCHI

Dove, in un racconto di fantascienza, il lettore incontra
i buchi neri e tutte le loro strane proprietà
alla luce di tutte le conoscenze
di cui si disponeva negli anni Novanta

Di tutte le cose concepite dalla mente umana, dagli unicorni alle gargouille, fino alla bomba all'idrogeno, la più fantastica è forse il buco nero: un buco nello spazio con un margine definito in cui tutto può cadere dentro e dal quale non può fuoriuscire nulla; un buco con una forza gravitazionale talmente potente da catturare e tenere in pugno perfino la luce; un buco che curva lo spazio e deforma il tempo[1]. Come gli unicorni e le gargouille, i buchi neri sembrano appartenere più al mondo della fantascienza e dei miti antichi che a quello dell'Universo reale. Ciononostante, leggi della fisica accuratamente verificate ne predicono con certezza l'esistenza. Solo nella nostra galassia potrebbero essercene milioni, ma la loro oscurità li nasconde alla vista. Gli astronomi hanno grande difficoltà a individuarli[2].

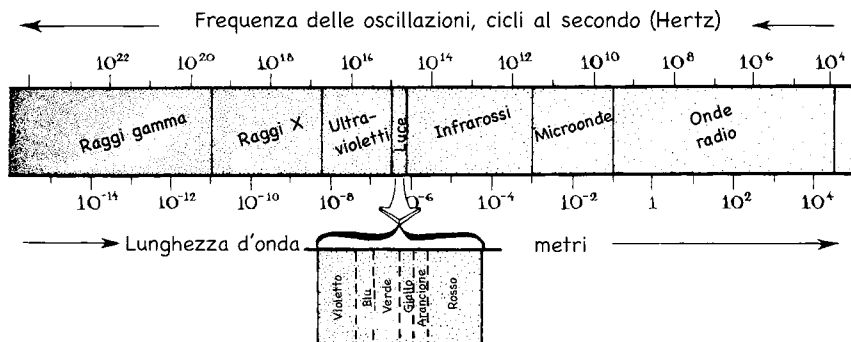
Hades

Immaginate di essere il comandante di una grande nave spaziale dotata di computer, robot e un equipaggio di centinaia di uomini ai vostri ordini. Siete stati incaricati dalla World Geographic Society di esplorare i buchi neri nelle più distanti regioni dello spazio interstellare e di riferire via radio sulla Terra le vostre descrizioni. Dopo sei anni di viaggio la vostra nave sta ora decelerando in prossimità del buco nero più vicino alla Terra, un buco chiamato «Hades» vicino alla stella Vega.

Sullo schermo del video della vostra nave voi e il vostro equipaggio osservate indizi della presenza del buco: gli atomi di gas dispersi nello spazio interstellare, approssimativamente uno per centimetro cubico, vengono attratti da tutte le direzioni dalla gravità del buco (figura 1). Essi fluiscono verso il

1 – Atomi di gas, attratti dalla gravità di un buco nero, fluiscono verso di esso da tutte le direzioni.

buco da tutte le direzioni, lentamente quando si trovano a grande distanza e la gravità esercita una debole attrazione, più velocemente quando si trovano più vicini, e in modo estremamente veloce – quasi alla velocità della luce – in prossimità del buco, dove la gravità è più forte. Se non si interviene, anche la vostra nave verrà risucchiata dentro.

Rapidamente e con precisione, il vostro secondo, Kares, manovra la nave allontanandola dal precipizio e la immette in un'orbita circolare, poi spegne i motori. Costeggiando il buco, la forza centrifuga del vostro moto circolare mantiene la nave fuori dall'attrazione gravitazionale del buco. La vostra nave è come la fionda di quando eravate bambini, con la pietra fissata all'estremità di una corda che ruota, spinta verso l'esterno dalla forza centrifuga e trattenuta dalla corda tessa, che è simile alla gravità del buco. Mentre la nave costeggia, voi e il vostro equipaggio vi preparate a esplorare il buco.

All'inizio esplorate passivamente: usate i telescopi della strumentazione di bordo per studiare le onde elettromagnetiche (la radiazione) che il gas emette mentre fluisce verso il buco. Lontano da quest'ultimo, gli atomi di gas sono freddi, appena qualche grado al di sopra dello zero assoluto. Essendo freddi, vibrano lentamente, e le loro vibrazioni lente producono onde elettromagnetiche che oscillano lentamente, ossia onde che presentano una grande distan-

2 – Lo spettro delle onde elettromagnetiche, che va dalle onde radio – a lunghezze d'onda molto lunghe (e frequenze molto basse) – ai raggi gamma – a lunghezze d'onda molto corte (e frequenze molto alte). Per una discussione sulla notazione qui utilizzata per i numeri (10^{21}, 10^{-12}, eccetera) si veda più avanti la scheda 1.

za tra una cresta e l'altra – lunghezze d'onda lunghe. Si tratta di onde radio (si veda la figura 2). Più vicino al buco, dove la gravità ha attirato gli atomi in un flusso più rapido, essi collidono tra loro e si riscaldano aumentando di diverse migliaia di gradi la loro temperatura. Il calore li fa vibrare più rapidamente ed emettere onde di lunghezza più corta e che oscillano più rapidamente, onde riconoscibili come luce di varie tonalità: rosso, arancione, giallo, verde, blu, violetto (figura 2). Molto più vicino al buco, dove la gravità è molto più forte e il flusso molto più veloce, le collisioni riscaldano gli atomi di diversi milioni di gradi, facendoli vibrare molto velocemente e produrre onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda molto breve: i raggi X. Osservandoli fuoriuscire dalle vicinanze del buco, ricordate che è stato proprio grazie alla scoperta e all'analisi di questi raggi X che gli astrofisici nel 1972 hanno identificato il primo buco nero nello spazio distante: Cygnus X-1, a seimila anni luce dalla Terra[3].

Puntando i telescopi ancora più vicino al buco, osservate i raggi gamma emessi dagli atomi riscaldati a temperature ancora più elevate. Poi, al centro di questo brillante quadro, vedete spuntare un'ampia sfera rotondeggiante, assolutamente nera; è il buco nero, che oscura tutta la luce, i raggi X e i raggi gamma emessi dagli atomi che lo oltrepassano. Vedete gli atomi iperri-

scaldati scorrere dentro il buco nero da ogni parte. Una volta dentro il buco, più caldi che mai, essi devono vibrare più velocemente e irradiare più energicamente che mai, ma le loro radiazioni non possono sfuggire all'intensa gravità del buco. Nulla può sfuggire. Ecco perché il buco appare nero, nero come la pece[4].

Con il vostro telescopio esaminate la sfera nera da vicino. Presenta un margine assolutamente sottile, la superficie del buco, l'ubicazione della zona di «non ritorno». Qualsiasi cosa si trovi appena *al di sopra* di questa superficie, con uno sforzo sufficiente, può sfuggire alla morsa della gravità: un razzo può aprirsi la strada con i suoi motori; le particelle, se scagliate a velocità sufficiente, possono sfuggire; la luce può sfuggire. Ma appena *al di sotto* della superficie la morsa della gravità è inesorabile; niente può più fuoriuscire da lì per quanto vi si impegni: né un razzo, né le particelle, né la luce, né le radiazioni di qualsiasi tipo; esse non possono più raggiungere la vostra nave spaziale orbitante. La superficie del buco, pertanto, è come l'orizzonte della Terra, oltre il quale non si può vedere. Questo è il motivo per cui è stata chiamata *orizzonte degli eventi*[5].

Il vostro secondo, Kares, misura attentamente la circonferenza dell'orbita della vostra nave spaziale. Essa è pari a un milione di chilometri, circa la metà della circonferenza dell'orbita della Luna intorno alla Terra. Poi guarda le stelle distanti e le osserva ruotare in alto mentre la nave si muove. Calcolando il loro moto apparente, deduce che la nave impiega 5 minuti e 46 secondi a circumnavigare il buco. Questo è il *periodo orbitale* della nave.

In base al periodo orbitale e alla circonferenza potete ora calcolare la massa del buco. Il vostro metodo di calcolo è lo stesso utilizzato da Isaac Newton nel 1685 per calcolare la massa del Sole: maggiore è la massa dell'oggetto, più forte è la sua attrazione gravitazionale e, pertanto, più veloce deve muoversi un corpo orbitante (una nave spaziale o un pianeta) per evitare di essere risucchiato all'interno, e quindi più breve deve essere il periodo orbitale del corpo. Applicando la versione matematica di Newton di questa legge gravitazionale[6] all'orbita della vostra nave, calcolate che il buco nero Hades ha una massa dieci volte più grande di quella del Sole («10 masse solari»)[7].

Sapete che questo buco nero è sorto molto tempo fa in seguito alla morte di una stella, morte in cui la stella, non più in grado di resistere all'attrazione verso l'interno esercitata dalla sua stessa gravità, è implosa su se stessa[8]. Sapete anche che, quando la stella è implosa, la sua massa non è cambiata; il buco nero attualmente ha la stessa massa, o quasi, che aveva la sua stella ma-

dre molto tempo fa. La massa di Hades in realtà deve essere un po' più grande, aumentata dalla massa di tutto ciò che è caduto nel buco da quando si è formato: gas interstellare, rocce, navi spaziali...

Sapete tutto ciò perché prima di imbarcarvi per il vostro viaggio, avete studiato le leggi fondamentali della gravità, leggi scoperte in forma approssimativa da Isaac Newton nel 1687 e radicalmente riformulate, più precisamente, da Albert Einstein nel 1915[9]. Avete appreso che le leggi gravitazionali di Einstein, dette *relatività generale*, costringono i buchi neri a comportarsi inesorabilmente in questo modo quanto costringono una pietra scagliata in aria a ricadere a terra. Per la pietra è impossibile violare le leggi della gravità e cadere verso l'alto o galleggiare in aria, e analogamente per un buco nero è impossibile sfuggire alle leggi gravitazionali: il buco deve nascere quando una stella implode su se stessa; la massa del buco, alla nascita, deve essere la stessa della stella; e ogni volta che qualcosa cade nel buco, la sua massa deve aumentare[10]. Analogamente, se la stella ruota quando implode su stessa, il buco neonato deve a sua volta ruotare, e il suo *momento angolare* (una misura precisa della sua velocità di rotazione), deve essere uguale a quello della stella.

Prima di iniziare il viaggio avete anche studiato la storia dell'interpretazione dei buchi neri. Negli anni Settanta Brandon Carter, Stephen Hawking, Werner Israel e altri, usando la descrizione relativistica generale[11] di Einstein delle leggi di gravità, hanno dedotto che un buco nero doveva essere una creatura estremamente semplice[12]; tutte le sue proprietà – l'intensità della sua forza gravitazionale, la misura in cui curva la traiettoria della luce stellare, la forma e le dimensioni della sua superficie – sono determinate da tre soli numeri: la massa del buco, di cui ora siete a conoscenza; il momento angolare della rotazione, che ancora non conoscete; e la sua carica elettrica. Sapete inoltre che nessun buco nello spazio interstellare può contenere molta carica elettrica; se lo facesse attirerebbe rapidamente al suo interno cariche opposte dal gas interstellare, neutralizzando in tal modo la propria carica.

Poiché ruota, il buco dovrebbe trascinare lo spazio intorno a sé in un movimento vorticoso simile a quello di un ciclone rispetto allo spazio molto lontano, come l'elica di un aeroplano che ruota trascina in movimento l'aria vicina a sé; e il vorticare dello spazio dovrebbe estendersi al movimento di qualsiasi cosa si trovi vicino al buco[13].

Per conoscere il momento angolare di Hades cercate quindi di individuare un turbinio simile a quello di un ciclone nel flusso di atomi di gas interstellare quando precipitano dentro il buco. Con vostra sorpresa, man mano

che si avvicinano al buco sempre più veloci, non appare alcuna traccia di vortice. Alcuni atomi, precipitando nel buco, ruotano in senso orario, altri in senso antiorario e a volte collidono con i precedenti, ma in media essi cadono direttamente all'interno (direttamente verso il basso) senza alcun vortice. La vostra conclusione è che questo buco nero pari a 10 masse solari non ruota quasi per niente, il suo momento angolare è prossimo allo zero.

Conoscendo la massa e il momento angolare del buco e sapendo che la sua carica elettrica deve essere trascurabilmente piccola, potete ora calcolare, usando le formule della relatività generale, tutte le proprietà che il buco sembra avere: la forza della sua attrazione gravitazionale, il corrispondente potere di curvatura della luce stellare, e, aspetto di grande interesse, la forma e le dimensioni del suo orizzonte.

Se il buco ruotasse, il suo orizzonte avrebbe dei poli nord e sud ben delineati, i poli attorno ai quali esso ruota e gli atomi vorticano mentre vi precipitano dentro. Avrebbe un equatore ben delineato a metà strada tra i due poli e la forza centrifuga della rotazione dell'orizzonte farebbe sporgere in fuori il suo equatore[14], proprio come sporge un po' l'equatore della Terra. Ma Hades quasi non ruota affatto, e quindi non deve presentare un rigonfiamento all'equatore. Il suo orizzonte deve essere costretto dalle leggi della gravità ad assumere una forma quasi esattamente sferica. Proprio come sembra dai vostri telescopi.

Quanto alle dimensioni, le leggi della fisica, così come descritte dalla relatività generale, affermano che quanto maggiore è la massa del buco, tanto più ampio deve essere il suo orizzonte. La circonferenza dell'orizzonte, in effetti, deve essere pari a 18,5 chilometri moltiplicato per la massa del buco espressa in unità di massa solare[15]. Poiché dalle vostre misurazioni orbitali sapete che il buco pesa dieci volte più del Sole, la circonferenza del suo orizzonte deve essere di 185 chilometri – più o meno la stessa di Los Angeles. Con i vostri telescopi misurate accuratamente la circonferenza: 185 chilometri; in perfetto accordo con la formula della relatività generale.

Questa circonferenza dell'orizzonte è minuscola rispetto all'orbita di un milione di chilometri della vostra nave spaziale, e premuta dentro quella esigua circonferenza si trova una massa dieci volte più grande di quella del Sole! Se il buco fosse un corpo solido compresso entro una circonferenza così piccola avrebbe una densità media pari a 200 milioni ($2x10^8$) tonnellate per centimetro cubo, $2x10^{14}$ (si veda la scheda 1) volte più denso dell'acqua. Ma il buco non è un corpo solido. La relatività generale afferma che le 10 masse solari di materia stellare che hanno creato il buco implodendo molto tempo

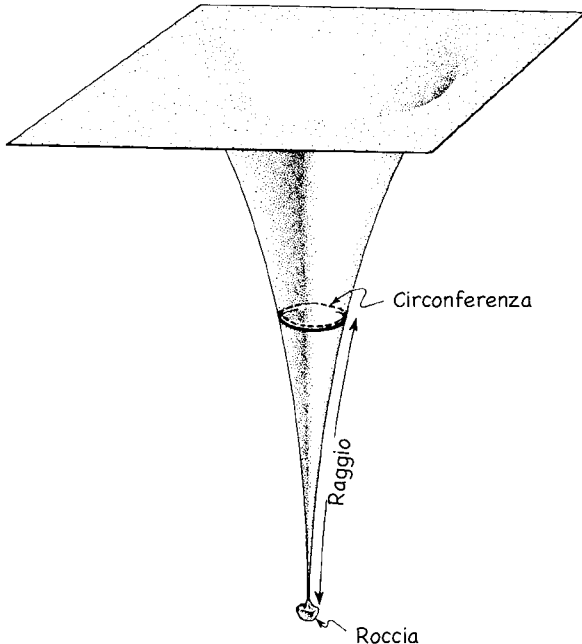
Scheda 1
LA NOTAZIONE ESPONENZIALE PER I NUMERI GRANDI E PICCOLI

In questo libro utilizzerò di tanto in tanto la «notazione esponenziale» per indicare numeri molto grandi o molto piccoli. Ad esempio 5×10^6, che significa cinque milioni, o 5.000.000, e 5×10^{-6}, che significa cinque milionesimi, o 0,000005.
In generale, la potenza alle quale il 10 viene elevato è il numero di cifre per cui bisogna spostare la virgola dei decimali per indicare il numero secondo la notazione decimale standard. Quindi 5×10^6 significa prendere 5 (5,00000000) e spostare la virgola a destra di sei cifre. Il risultato è 5000000,00. Analogamente, 5×10^{-6} significa prendere 5 e spostare la virgola a sinistra di sei cifre. Il risultato è 0,000005.

fa sono ora concentrate nel centro esatto del buco, concentrate in una minuscola regione di spazio che viene chiamata una *singolarità*[16]. Questa singolarità, approssimativamente, è delle dimensioni di 10^{-33} centimetri (un centinaio di miliardi di miliardi di volte più piccola di un nucleo atomico) e dovrebbe essere circondata dal puro vuoto, a parte l'inconsistente gas interstellare che vi sta cadendo dentro e le radiazioni che esso emette. Dovrebbe esserci pressoché il vuoto tra la singolarità e l'orizzonte, e altrettanto tra l'orizzonte e la vostra nave spaziale.

La singolarità e la materia stellare che vi è imprigionata sono nascoste dall'orizzonte del buco. Per quanto a lungo attendiate, la materia imprigionata non potrà mai riemergere. La gravità del buco lo impedisce. Né la materia imprigionata può inviarvi informazioni sotto forma di onde radio, di luce o di raggi X. A tutti gli effetti pratici, essa è definitivamente scomparsa dal nostro Universo. La sola cosa che lascia dietro di sé è la sua intensa attrazione gravitazionale, la stessa che la vostra orbita di un milione di chilometri subisce oggi rispetto a quando la stella non era ancora implosa a formare il buco, ma che sull'orizzonte e all'interno di esso è talmente forte che niente può resisterle.

«Qual è la distanza tra l'orizzonte e la singolarità?», vi domandate. (Ovviamente, decidete di non misurarla. Una simile misurazione sarebbe suicida, non potreste mai più fuoriuscire dall'orizzonte per riferire i risultati alla

World Geographical Society). Poiché è così piccola, 10^{-33} centimetri, e si trova esattamente al centro del buco, la distanza tra la singolarità e l'orizzonte dovrebbe essere uguale al raggio di quest'ultimo. Siete tentati di calcolarlo con il metodo standard dividendo la circonferenza per 2π (6,283185307...). Tuttavia, nei vostri studi sulla Terra vi è stato raccomandato di non credere a questo calcolo. L'enorme attrazione gravitazionale del buco distorce completamente la geometria dello spazio al suo interno e nelle sue vicinanze[17], in modo molto simile a quello con cui una roccia estremamente pesante depositata su un foglio di gomma ne deforma la geometria (figura 3), e di conseguenza il raggio dell'orizzonte non è uguale alla circonferenza diviso per 2π.

3 – Una roccia pesante collocata su un foglio di gomma (ad esempio, un trampolino) lo distorce nel modo indicato. La geometria distorta del foglio è molto simile alle deformazioni della geometria dello spazio attorno e all'interno di un buco nero. Ad esempio, la circonferenza dello spesso cerchio nero è molto inferiore a 2π volte il suo raggio, così come la circonferenza dell'orizzonte del buco è molto inferiore a 2π volte il suo raggio. Per ulteriori dettagli, si vedano i capitoli III e XIII.

«Non importa», vi dite. «Lobachevsky, Riemann e altri grandi matematici ci hanno insegnato come calcolare le proprietà dei cerchi quando lo spazio è incurvato, e Einstein ha incorporato tali calcoli nella sua descrizione relativistica generale delle leggi della gravità. Posso usare queste formule sullo spazio curvo per calcolare il raggio dell'orizzonte».

Ma poi, grazie agli studi fatti sulla Terra, ricordate che sebbene la massa e il momento angolare di un buco nero determinino tutte le proprietà del suo orizzonte e del suo esterno, essi non determinano il suo interno. La relatività generale afferma che l'interno, in prossimità della singolarità, dovrebbe essere caotico e violentemente non sferico[18], come la punta del foglio di gomma della figura 3 se la roccia è frastagliata e rimbalza violentemente su e giù. Inoltre, la natura caotica del centro del buco dipenderà non solo dalla sua massa e dal suo momento angolare, ma anche dalle particolari modalità dell'implosione stellare che gli ha dato vita, e dalle modalità della conseguente caduta al suo interno di gas interstellare – modalità che non conoscete.

«Cosa importa», vi dite. «Qualunque sia la sua struttura, il centro caotico deve avere una circonferenza molto più piccola di un centimetro. Pertanto, commetterei un errore molto piccolo se nel calcolare il raggio dell'orizzonte l'ignorassi».

Ma poi ricordate che lo spazio può essere deformato in modo talmente estremo in prossimità della singolarità che la regione caotica può avere un raggio di milioni di chilometri pur avendo una circonferenza pari solo a una frazione di un centimetro, proprio come la roccia della figura 3, se è abbastanza pesante, può far sprofondare estremamente in basso la punta caotica del foglio di gomma lasciando tuttavia che la circonferenza della regione caotica resti estremamente piccola. Gli errori nel calcolo del raggio potrebbero quindi essere enormi. Il raggio dell'orizzonte è semplicemente impossibile da calcolare sulla base delle scarse informazioni di cui disponete: la massa del buco nero e il suo momento angolare.

Una volta abbandonate le vostre elucubrazioni sull'interno del buco, vi preparate a esplorare i dintorni del suo orizzonte. Poiché non volete rischiare vite umane, chiedete a un robot di nome Arnold, alto dieci centimetri e dotato di propulsore, di effettuare l'esplorazione e trasmettere i risultati alla nave spaziale. Arnold riceve delle istruzioni semplici: deve attivare il suo propulsore in misura appena sufficiente a interrompere il moto circolare che ha condiviso con la nave spaziale, poi spegnerlo e lasciare che la gravità del buco lo trascini verso il basso. Mentre precipita, Arnold deve trasmettere un raggio

laser verde brillante alla nave, e nelle oscillazioni elettromagnetiche del fascio deve codificare le informazioni relative alla distanza che ha percorso e alle condizioni delle sue apparecchiature elettroniche, come un'emittente radio codifica un notiziario nelle onde radio che trasmette.

L'equipaggio della nave riceverà il raggio laser e Kares lo decodificherà in modo da acquisire le informazioni sulla distanza e lo stato della strumentazione. Misurerà inoltre la lunghezza d'onda del raggio (o, in modo equivalente, il colore; si veda la figura 2). La lunghezza d'onda è importante: rivela la velocità alla quale Arnold si sta muovendo. Man mano che accelera allontanandosi, il raggio verde che emette subisce uno *spostamento Doppler*[19], osservato al suo arrivo sulla nave, verso lunghezze d'onda sempre più lunghe, ossia diventa sempre più rosso (vi è un ulteriore spostamento verso il rosso provocato dalla lotta del raggio contro l'attrazione gravitazionale del buco. Nell'effettuare i calcoli, Kares deve apportare delle correzioni per tenere conto di questo *spostamento gravitazionale verso il rosso*)[20].

Ha così inizio l'esperimento. Arnold esce dall'orbita e comincia il suo percorso di caduta. Quando inizia a precipitare, Kares avvia un orologio per registrare i tempi di arrivo dei suoi segnali laser. Passati dieci secondi, il segnale laser decodificato riferisce che tutte le apparecchiature sono funzionanti, e che ha già percorso una distanza di 2630 chilometri. In base al colore della luce laser, Kares calcola che Arnold sta precipitando a una velocità di 550 chilometri al secondo. Quando l'orologio segna venti secondi, la sua velocità è raddoppiata a 1060 chilometri al secondo e la sua distanza è quadruplicata fino a raggiungere i 10.500 chilometri. L'orologio continua a ticchettare. A sessanta secondi la velocità ha raggiunto i 9700 chilometri al secondo e la distanza percorsa è ormai di 135.000 chilometri, cinque sesti del tragitto che conduce all'orizzonte.

Ora dovete fare molta attenzione. I prossimi secondi saranno cruciali, quindi Kares attiva un dispositivo di registrazione ad alta velocità per raccogliere ogni particolare dei dati in arrivo. A 61 secondi Arnold riferisce che tutte le apparecchiature funzionano ancora normalmente; l'orizzonte è 14.000 chilometri sotto di lui e sta precipitando a 13.000 chilometri al secondo. A 61,7 secondi ancora tutto bene, altri 1700 chilometri da percorrere, velocità 39.000 chilometri al secondo – circa un decimo della velocità della luce – e il colore del laser comincia a cambiare rapidamente. Nel decimo di secondo seguente osservate meravigliati il colore del laser sfrecciare attraverso lo spettro elettromagnetico, dal verde al rosso, all'infrarosso, alle microonde, alle onde radio, a… A 61,8 secondi è tutto finito. Il raggio laser è del

tutto sparito. Arnold ha raggiunto la velocità della luce ed è scomparso oltre l'orizzonte. E in quell'ultimo decimo di secondo appena prima che il raggio svanisse Arnold ha comunicato allegramente: «Tutte le apparecchiature funzionano, tutte le apparecchiature funzionano, l'orizzonte si avvicina, tutte le apparecchiature funzionano, tutte le apparecchiature funzionano…».

Una volta scemata la vostra eccitazione, esaminate i dati registrati. Vi trovate tutti i particolari relativi al cambiamento di lunghezza d'onda del laser. Osservate che mentre Arnold precipitava la lunghezza d'onda del segnale laser aumentava lentamente in un primo momento e poi sempre più rapidamente. Ma, sorprendentemente, dopo essersi quadruplicata, il tasso al quale raddoppiava è divenuto pressoché costante; a partire da quel momento la lunghezza d'onda è raddoppiata ogni 0,00014 secondi. Dopo 33 raddoppi (0,0046 secondi), ha raggiunto i quattro chilometri di lunghezza, il limite di capacità delle vostre apparecchiature. Presumibilmente, la lunghezza d'onda ha continuato a raddoppiare anche dopo. Poiché essa deve raddoppiare un numero infinito di volte prima di diventare infinita, dei segnali estremamente deboli, di onde estremamente lunghe, potrebbero ancora emergere in prossimità dell'orizzonte!

Ciò significa che Arnold non ha ancora attraversato l'orizzonte e che non lo farà mai? Assolutamente no. Quegli ultimi segnali, che si raddoppiano in eterno, impiegano un'eternità a risalire e liberarsi dall'attrazione gravitazionale del buco. Arnold ha varcato l'orizzonte viaggiando alla velocità della luce molti minuti fa. I deboli segnali rimanenti continuano a essere emessi solo perché il loro tempo di viaggio è così lungo. Sono solo reliquie del passato[21].

Dopo aver studiato per molte ore i dati relativi alla caduta di Arnold, e dopo un buon sonno ristoratore, intraprendete la fase successiva dell'esplorazione. Questa volta verificherete di persona la distanza dell'orizzonte, ma sarete molto più prudenti di Arnold.

Congedandovi dall'equipaggio, salite a bordo di una capsula spaziale, emergete dal ventre della nave e vi immettete in un'orbita circolare accanto a essa. Poi accendete i motori quanto basta a ridurre leggermente il vostro moto orbitante. Ciò riduce lievemente la forza centrifuga che trattiene in alto la vostra capsula, e la gravità del buco vi attira in un'orbita circolare, perimetrale, leggermente più piccola. Quando accendete di nuovo leggermente i motori, la vostra orbita circolare si restringe di nuovo leggermente. L'obiettivo di questa moderata, cauta spirale verso l'interno è quello di raggiungere un'orbita circolare appena al di sopra dell'orizzonte, un'orbita dalla circonferenza solo 1,0001 volte più ampia di quella dell'orizzonte stesso. Da lì po-

tete esplorare la maggior parte delle sue caratteristiche riuscendo ancora a sottrarvi alla sua attrazione fatale.

Mentre la vostra orbita si restringe lentamente, tuttavia, comincia ad accadere qualcosa di strano. Ve ne accorgete già a partire da una circonferenza di 100.000 chilometri. Galleggiando all'interno della capsula, con i piedi verso il buco e la testa verso le stelle, avvertite una lieve trazione verso il basso ai piedi, e una lieve trazione verso l'alto alla testa; venite allungati come una gomma americana, ma delicatamente. La causa, vi rendete conto, è la gravità del buco: i vostri piedi gli sono più vicini della vostra testa e quindi il buco attira con maggior forza i primi rispetto alla seconda. Avveniva lo stesso, naturalmente, quando eravate sulla Terra, ma la differenza tra i piedi e la testa sulla Terra era talmente minuscola, meno di una parte su un milione, che non ve ne siete mai accorti. Invece, mentre fluttuate nella vostra capsula lungo una circonferenza di 100.000 chilometri, la differenza tra i piedi e la testa è un ottavo della gravità terrestre ($1/8$ '*g*'). Al centro del vostro corpo la forza centrifuga del vostro moto orbitale controbilancia perfettamente l'attrazione del buco. È come se la gravità non esistesse, fluttuate liberamente. Ma la maggiore gravità all'altezza dei vostri piedi tira verso il basso con un ulteriore $1/16$ *g*, mentre la minore gravità all'altezza della vostra testa consente alla forza centrifuga di spingere verso l'alto con un ulteriore $1/16$ *g*.

Perplessi, proseguite lungo la vostra spirale a rientrare, ma la vostra perplessità si trasforma rapidamente in preoccupazione. Man mano che l'orbita rimpicciolisce, crescono le forze esercitate sulla vostra testa e sui vostri piedi. A una circonferenza di 80.000 chilometri la differenza corrisponde a una forza di trazione pari a $1/4$ *g*; a 50.000 chilometri è pari alla gravità terrestre; a 30.000 chilometri è quattro volte la gravità terrestre. Stringendo i denti per il dolore mentre i vostri piedi e la vostra testa vengono tirati in direzioni opposte, continuate fino a 20.000 chilometri e a una forza pari a 15-*g*. Di più non potete sopportare! Cercate di risolvere il problema raggomitolandovi su voi stessi, in modo che la testa e i piedi siano più vicini e la differenza tra le due forze sia minore, ma esse sono così potenti da impedirvi di ripiegarvi su voi stessi e vi allungano di nuovo in un raggio teso fra la testa e i piedi. Se la capsula prosegue lungo la sua spirale, il vostro corpo cederà e andrà in pezzi. Non c'è speranza di arrivare in prossimità dell'orizzonte.

Frustrati, ed enormemente indolenziti, arrestate la discesa della capsula e cominciate lentamente e con cautela a risalire verso orbite circolari di circonferenza sempre più larga fino a rientrare nel ventre della nave spaziale.

Nella stanza del comandante, sfogate la vostra frustrazione con DAWN, il

computer principale della nave. «Tikhii, tikhii», risponde rassicurante (prendendo in prestito parole dal russo antico). «So che sei irritato, ma in realtà la colpa è tua. Ti avevano parlato di queste forze durante l'addestramento. Ricordi? Sono le stesse forze che producono le maree negli oceani della Terra»[22].

Ripensando all'addestramento, ricordate che gli oceani sulla faccia della Terra più vicina alla Luna vengono attirati con maggior forza dalla sua gravità e quindi si gonfiano verso il nostro satellite. Il risultato consiste in due rigonfiamenti degli oceani, e poiché la Terra ruota, tali rigonfiamenti appaiono sotto forma di due alte maree ogni ventiquattro ore. In onore di queste maree, ricordate, le forza gravitazionale esercitata sui piedi e sulla testa che avete avvertito è stata battezzata *forza di marea*. Ricordate anche che secondo la relatività generale di Einstein questa forza di marea è dovuta a una curvatura dello spazio e a una deformazione del tempo o, nel linguaggio di Einstein, a una *curvatura dello spaziotempo*[23]. Le forze di marea e le distorsioni dello spaziotempo vanno di pari passo, l'una accompagna sempre l'altra, anche se nel caso delle maree degli oceani la distorsione dello spaziotempo è talmente esigua che può essere misurata solo con strumenti ad altissima precisione.

Ma che cosa ne è stato di Arnold? Come mai era così spensieratamente immune alla forza di marea del buco? Per due ragioni: primo, perché era molto più piccolo di voi, solo dieci centimetri di altezza, e la forza di marea, che è la differenza di trazione esercitata sulla testa e sui piedi, era minore in misura corrispondente; e, secondo, perché era fatto di una lega di titanio ultraresistente capace di sopportare la forza di trazione molto meglio del vostro corpo fatto di carne e ossa.

Poi vi rendete conto con orrore che precipitando verso l'orizzonte e oltre, verso la singolarità, Arnold deve aver sentito aumentare la forza di marea fino a quando anche la sua struttura di titanio ultraresistente non avrà più potuto resistere. Meno di 0,0002 secondi dopo aver oltrepassato l'orizzonte il suo corpo, teso fino a disintegrarsi, deve essersi avvicinato alla singolarità al centro del buco. Lì, ricordate dallo studio della relatività generale fatto sulla Terra, devono manifestarsi le forze di marea del buco in una danza sfrenata, tirando i resti di Arnold in una direzione, poi nell'altra, sempre più velocemente, sempre più forte, fino a distorcere anche i singoli atomi di cui era composto e a renderli irriconoscibili. Questa, infatti, è una delle caratteristiche essenziali della singolarità: è una regione in cui la curvatura dello spaziotempo con le sue caotiche oscillazioni crea enormi e caotiche forze di marea[24].

Meditando sulla storia della ricerca sui buchi neri, ricordate che nel 1965 il fisico inglese Roger Penrose ha utilizzato la descrizione delle leggi della fi-

sica in base alla relatività generale per dimostrare che una singolarità deve essere presente all'interno di ogni buco nero, e che nel 1969 la troika russa composta da Lifshitz, Khalatnikov e Belinski vi ha fatto ricorso per dedurre che molto vicino alla singolarità la marea gravitazionale deve oscillare caoticamente, come se una gomma americana venisse allungata prima in una direzione e poi nell'altra da un'apposita macchina[25].

Gli anni Sessanta e Settanta sono stati l'epoca d'oro della ricerca teorica sui buchi neri! Ma poiché i fisici in quegli anni d'oro non sono stati abbastanza intelligenti da risolvere le equazioni della relatività generale di Einstein, è sfuggita loro una caratteristica fondamentale dei buchi neri. Essi potevano solo ipotizzare che ogni volta che l'implosione di una stella crea una singolarità deve creare anche un orizzonte circostante che la nasconde alla vista; una singolarità non può mai essere creata «nuda» in nessun angolo dell'Universo. Penrose la chiamava «congettura della censura cosmica», poiché, se corretta, censurerebbe tutte le informazioni sperimentali sulle singolarità: non si potrebbero mai effettuare esperimenti per verificare la conoscenza teorica delle singolarità, a meno di non voler pagare il prezzo di entrare in un buco nero, e morire effettuando le misurazioni senza nemmeno essere in grado di comunicarne i risultati all'esterno del buco a testimonianza degli sforzi compiuti.

Sebbene Dame Abygaile Lyman, nel 2023, abbia finalmente risolto la questione dell'esistenza o meno della censura cosmica, la soluzione ora è per voi irrilevante. Le sole singolarità riportate sulle mappe di bordo sono quelle all'interno dei buchi neri, e voi vi rifiutate di pagare con la vita la loro esplorazione.

Fortunatamente, al di fuori ma in prossimità dell'orizzonte di un buco nero vi sono molti fenomeni da esplorare. Siete decisi a sperimentare tali fenomeni di persona e a riferire in merito alla World Geographic Society, ma non potete farlo nelle vicinanze dell'orizzonte di Hades. La forza di marea, laggiù, è troppo forte. Dovete invece esplorare un buco nero in cui le forze di marea siano più deboli.

La relatività generale, vi ricorda DAWN, prevede che man mano che il buco aumenta la sua massa, le forze di marea all'orizzonte e al di sopra di esso si facciano più deboli. Questo comportamento apparentemente paradossale ha un'origine semplice: la forza di marea è proporzionale alla massa del buco nero diviso per il cubo della sua circonferenza, perciò man mano che la massa cresce, e la circonferenza dell'orizzonte aumenta proporzionalmente, la forza di marea in prossimità dell'orizzonte diminuisce. Per un buco che pesi un milione di masse solari, che abbia cioè una massa 100.000 volte più grande di quella di Hades, l'orizzonte sarà 100.000 volte più ampio e la

forza di marea in quella regione sarà 10 miliardi (10^{10}) di volte più debole. Sarebbe gradevole, nessun dolore! Quindi cominciate a progettare la prossima fase del vostro viaggio: una spedizione verso il più vicino buco con una massa un milione di volte più grande di quella del Sole riportato nell'Atlante Schechter dei buchi neri – un buco chiamato Sagittario ubicato al centro della nostra galassia della Via Lattea a 30.100 anni luce di distanza.

Alcuni giorni dopo, il vostro equipaggio trasmette alla Terra una descrizione particolareggiata delle esplorazioni di Hades effettuate, compresa una ripresa che vi mostra mentre subite gli effetti delle forze di marea e immagini degli atomi che precipitano nel buco. La descrizione richiederà 26 anni per percorrere i 26 anni luce di distanza dalla Terra, e quando infine vi giunge, viene pubblicata con grande risalto dalla World Geographical Society.

L'equipaggio descrive anche il vostro progetto di una spedizione al centro della Via Lattea: i motori della vostra nave spaziale percorreranno tutto il tragitto con un'accelerazione pari a 1-*g*, in modo che voi e il vostro equipaggio sperimentiate all'interno una gradevole forza pari a 1-*g* gravità terrestre. La nave accelererà verso il centro della galassia per metà del viaggio, poi virerà di 180 gradi e decelererà fino a 1 *g* per la seconda metà. La distanza totale di 30.100 anni luce richiederà 30.102 anni in base al calcolo terrestre, ma in base al calcolo effettuato a bordo della nave richiederà solo venti anni. D'accordo con le leggi della relatività ristretta di Einstein[26], l'elevata velocità della vostra nave farà «dilatare» il tempo, misurato a bordo, e questa *dilatazione temporale* (o *deformazione temporale*) farà in effetti comportare la nave spaziale come una macchina del tempo, proiettandovi nel lontano futuro della Terra, mentre subirete solo un modesto invecchiamento[27].

Spiegate alla World Geographic Society che effettuerete la prossima trasmissione in prossimità del centro della galassia dopo aver esplorato il buco da un milione di masse solari, Sagittario. I membri della Società devono farsi ibernare per 60.186 anni se vogliono ricevere il vostro messaggio (30.102 – 26 = 30.076 anni dal momento in cui ricevono il vostro messaggio fino a quando avrete raggiunto il centro della galassia, più i 30.110 anni che la vostra trasmissione impiegherà per raggiungere la Terra dal centro della galassia).

Sagittario

Dopo vent'anni di viaggio, secondo il calcolo del tempo a bordo, la nave decelera al centro della Via Lattea. Lì scorgete in lontananza una densa mi-

scela di gas e polveri che fluisce da ogni direzione verso l'interno di un enorme buco nero. Kares regola i motori in modo da condurre la nave su un'orbita periferica circolare, ben al di sopra dell'orizzonte. Misurando la circonferenza e il periodo dell'orbita e inserendo i risultati nella formula di Newton determinate la massa del buco. È un milione di volte la massa del Sole, proprio come affermato dall'Atlante Schechter dei buchi neri. Dall'assenza di vortici simili a cicloni nel gas e nelle polveri che vi precipitano dentro deducete che il buco presenta una rotazione molto ridotta, il suo orizzonte, pertanto, deve essere sferico e la sua circonferenza deve misurare 18,5 milioni di chilometri, otto volte più ampia dell'orbita della Luna attorno alla Terra.

Dopo aver ulteriormente esaminato i gas in caduta, vi preparate a scendere verso l'orizzonte. Per sicurezza, Kares apre un canale di comunicazione laser tra la vostra capsula spaziale e il computer principale di bordo, DAWN. Poi abbandonate il ventre della nave spaziale, orientate la capsula in modo che punti in direzione del moto orbitale circolare e avviate delicatamente i motori per ridurre il vostro moto orbitale e scivolare lentamente verso l'interno (verso il basso), passando da un'orbita periferica circolare a un'altra.

Tutto va come previsto finché raggiungete un'orbita della circonferenza di 55 milioni di chilometri, appena tre volte quella dell'orizzonte. A quel punto, la lieve spinta del vostro motore invece di condurvi su un'orbita circolare leggermente più stretta vi scaglia in un tuffo suicida verso l'orizzonte. In preda al panico, girate la capsula e risalite a tutto gas verso un'orbita appena piú ampia di 55 milioni di chilometri.

«Cosa diavolo non ha funzionato?», chiedete a DAWN attraverso il collegamento laser.

«Tikhii tikhii», replica rassicurante il computer. «Hai progettato la tua orbita applicando la descrizione di Newton delle leggi di gravità. Ma essa è solo un'approssimazione delle vere leggi gravitazionali che governano l'Universo[28]. È un'approssimazione eccellente lontano dall'orizzonte, ma sbagliata nelle sue vicinanze. La descrizione in base alla relatività generale di Einstein è molto più precisa; essa concorda in modo estremamente preciso con le vere leggi di gravità in prossimità dell'orizzonte e prevede che avvicinandovisi l'attrazione diventi molto più forte di quanto Newton non si aspettasse. Per rimanere su un'orbita circolare in cui questa maggiore gravità sia controbilanciata dalla forza centrifuga bisogna aumentare quest'ultima, il che vuol dire che devi aumentare la velocità alla quale ruoti intorno al buco nero: se scendi di tre circonferenze verso l'orizzonte devi azionare i motori in avanti lungo l'orbita. Siccome invece li hai azionati all'indietro, rallentan-

do il moto, quando sei sceso di tre circonferenze verso l'orizzonte la gravità ha superato la forza centrifuga e ti ha risucchiato all'interno».

«Dannato DAWN», pensate tra voi. «Risponde sempre alle mie domande, ma non mi fornisce mai spontaneamente le informazioni fondamentali. Non mi avverte mai quando mi sto sbagliando!». Ovviamente, sapete qual è la ragione. L'esistenza umana perderebbe il suo fascino se ai computer fosse permesso di avvisarci quando stiamo per commettere un errore qualsiasi. Nel 2032 il Consiglio Mondiale ha approvato una legge che prevede l'installazione in tutti i computer di un blocco di Hobson che impedisca simili avvertimenti. Per quanto faccia, DAWN non può eludere il suo blocco di Hobson.

Calmate la vostra esasperazione, ruotate la capsula e iniziate una prudente sequenza – macchina avanti, spirale a rientrare, costeggiare, macchina avanti, spirale a rientrare, costeggiare, macchina avanti, spirale a rientrare, costeggiare – che da una circonferenza 3 volte quella dell'orizzonte vi porta a 2,5, 2,0, 1,6, 1,55, 1,51, 1,505, 1,501... Che frustrazione! Più date gas e più il vostro moto circolare diventa veloce, più si restringe la vostra orbita; ma quando la vostra velocità si avvicina alla velocità della luce la vostra orbita è ancora 1,5 volte la circonferenza dell'orizzonte. Poiché non potete viaggiare più veloci della luce, non c'è speranza di avvicinarsi all'orizzonte in questo modo.

Chiedete di nuovo aiuto a DAWN, che ancora una volta vi rassicura e spiega: oltre le circonferenze ampie 1,5 volte l'orizzonte non vi è più nessuna orbita circolare. L'attrazione gravitazionale lì è così forte che non può essere contrastata da nessuna forza centrifuga, nemmeno se uno costeggiasse il buco alla velocità della luce. Se volete avvicinarvi di più, dice DAWN, dovete abbandonare la vostra orbita circolare periferica e scendere direttamente verso l'orizzonte dirigendo il getto di scarico verso il basso per evitare di precipitare in modo catastrofico. La forza dei motori vi sosterrà contrastando la forza di gravità del buco mentre scendete lentamente e poi fluttuate al di sopra dell'orizzonte, come farebbe un astronauta sospeso al di sopra della superficie lunare.

Avendo ormai imparato per esperienza a essere cauti, chiedete a DAWN quali siano le conseguenze di un getto a reazione così potente. Gli spiegate che volete galleggiare in un punto, su una circonferenza 1,0001 volte quella dell'orizzonte, dove sia possibile sperimentare la maggior parte dei suoi effetti, ma alla quale si possa poi sfuggire. Se sostenete in quel punto la vostra capsula grazie a un getto costante, che forza avrà l'accelerazione che subirete? «Centocinquanta milioni di volte quella della gravità terrestre», risponde cortesemente DAWN.

Profondamente scoraggiati, ripartite e risalite lungo le spirali fino a rientrare nel ventre della nave spaziale.

Dopo un lungo sonno, seguito da cinque ore di calcoli con le formule sui buchi neri della relatività generale, tre ore passate a frugare nell'Atlante Schechter dei buchi neri, e un'ora di consultazioni con l'equipaggio, elaborate un piano per la fase seguente del vostro viaggio.

L'equipaggio trasmette alla World Geographic Society, nell'ottimistica ipotesi che esista ancora, una relazione delle vostre esperienze con Sagittario, e alla fine del messaggio descrive il vostro piano: i vostri calcoli indicano che quanto più il buco è grande, tanto più debole sarà il getto dei motori di cui avete bisogno per galleggiare a una circonferenza 1,0001 volte quella del suo orizzonte. Per un getto di intensità pari a dieci gravità terrestri, dolorosa ma sopportabile, il buco deve avere una massa pari a 15.000 miliardi (15×10^{12}) di volte quella del Sole. Il buco più vicino con queste caratteristiche si chiama Gargantua, ben al di fuori dei 100.000 (10^5) anni luce che segnano i confini della Via Lattea, e anche dei 100 milioni (10^8) di anni luce a cui dista il grappolo di galassie Virgo attorno al quale orbita la Via Lattea. Infatti, si trova vicino al quasar 3C273, a due miliardi (2×10^9) di anni luce di distanza dalla nostra galassia, pari al dieci per cento della distanza dai confini della parte osservabile dell'Universo.

Il piano, spiega l'equipaggio nel suo messaggio, consiste in una spedizione verso Gargantua. Utilizzando la consueta accelerazione 1-*g*, per la prima metà del viaggio e una decelerazione 1-*g*, per la seconda parte, la spedizione richiederà due miliardi di anni, calcolati dalla Terra, ma, grazie alla deformazione temporale provocata dall'alta velocità, solo 42 anni per voi e il vostro equipaggio a bordo della nave spaziale. Se i membri della World Geographical Society non vogliono affrontare un'ibernazione di quattro miliardi di anni (due miliardi di anni prima che la nave raggiunga Gargantua e altri due prima che un suo messaggio raggiunga la Terra), dovranno rinunciare a ricevere il vostro prossimo comunicato.

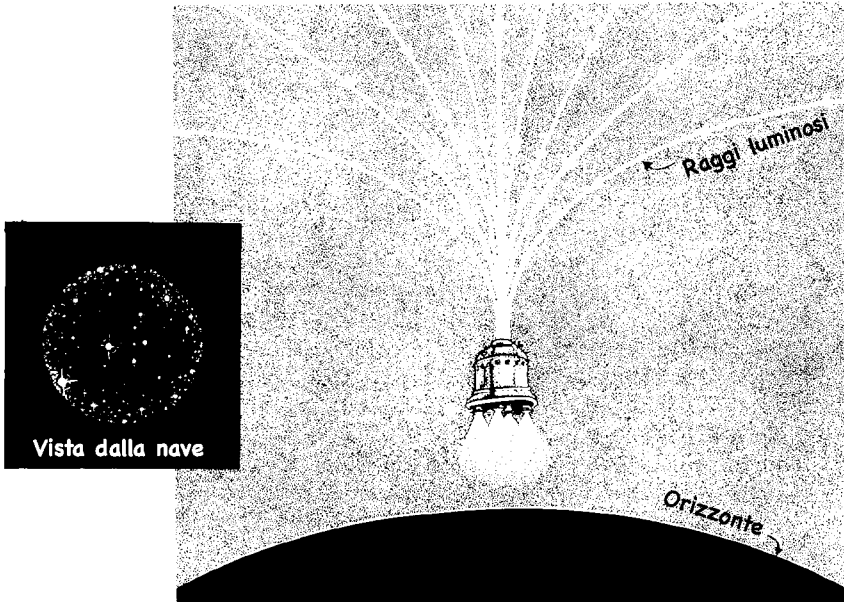
Gargantua

Quarantadue anni dopo, secondo il calendario di bordo, la vostra nave decelera in prossimità di Gargantua. Sopra di voi vedete il quasar 3C273, con due getti di un azzurro brillante che sgorgano dal centro[29]; sotto si profila l'abisso nero di Gargantua. Immettendovi in un'orbita attorno a Gar-

gantua ed effettuando le consuete misurazioni, ottenete conferma del fatto che la sua massa corrisponde, in effetti, a 15.000 miliardi di volte quella del Sole, osservate che ruota molto lentamente, e in base a questi dati calcolate che la circonferenza del suo orizzonte è di 29 anni luce. Ecco, infine, un buco di cui potete esplorare le vicinanze subendo forze di marea e accelerazioni sopportabilmente lievi! La sicurezza dell'esplorazione è garantita al punto che decidete di scendere con l'intera nave anziché con la capsula.

Prima di iniziare la discesa, tuttavia, ordinate all'equipaggio di fotografare il quasar gigante lassù, le migliaia di miliardi di stelle che orbitano attorno a Gargantua, e i miliardi di galassie sparsi nel cielo. I vostri uomini fotografano anche il disco nero di Gargantua sotto di voi; ha all'incirca le dimensioni del Sole visto dalla Terra. A prima vista sembra occultare la luce proveniente da tutte le stelle e le galassie che vi si trovano dietro. Ma osservando più attentamente, il vostro equipaggio scopre che il campo gravitazionale del buco ha agito come una lente[30] deflettendo parte della luce stellare e galattica attorno al margine dell'orizzonte e concentrandola in un sottile anello brillante al margine del disco nero. Lì, in quell'anello, vedete diverse immagini di ogni stella oscurata: un'immagine prodotta dai raggi luminosi deflessi attorno al bordo sinistro, un'altra da quelli attorno al bordo destro, una terza dai raggi attratti in un'orbita completa intorno al buco e poi rilasciati nella vostra direzione, una quarta dai raggi che hanno compiuto due orbite attorno al buco, e così via. Il risultato è una struttura altamente complessa a forma di anello, che il vostro equipaggio fotografa nei minimi dettagli per analizzarla in seguito.

Una volta completata la sessione fotografica, ordinate a Kares di iniziare la discesa della nave spaziale. Ma dovete pazientare. Il buco è talmente enorme che, accelerando e poi decelerando a 1 *g*, ci vorranno 13 anni di tempo misurato a bordo della nave per raggiungere il vostro obiettivo su un'orbita pari a 1,0001 volte la circonferenza dell'orizzonte!

Durante la discesa l'equipaggio scatta una serie di fotografie per documentare i cambiamenti di aspetto del cielo intorno alla nave. La cosa più notevole è il mutare del disco nero del buco sotto la nave, che diventa gradualmente più grande. Vi aspettate che smetta di crescere quando avrà coperto tutto il cielo sotto di voi come un gigantesco pavimento nero, lasciando il cielo al di sopra limpido come sulla Terra. Invece no; il disco nero continua a crescere avvolgendo i fianchi della nave per ricoprire tutto eccetto un'apertura luminosa, circolare sopra di voi, attraverso la quale vedete l'Universo esterno (figura 4). È come se foste entrati in una caverna e vi spingeste sempre più in fondo, vedendo l'imboccatura luminosa restringersi progressivamente in lontananza.

4 – La nave spaziale sospesa sopra l'orizzonte del buco nero e le traiettorie lungo le quali viaggia fino a essa dalle galassie lontane (i raggi luminosi). La gravità del buco deflette i raggi luminosi verso il basso («effetto di lente gravitazionale») presentando a chi si trova a bordo della nave tutta la luce concentrata in un'apertura circolare luminosa al di sopra di sé.

Terribilmente preoccupati chiedete aiuto a DAWN: «Kares ha sbagliato a calcolare la rotta? Abbiamo attraversato l'orizzonte? Siamo perduti?».

«Tikhii, tikhii», risponde rassicurante. «Siamo al sicuro, siamo ancora fuori dell'orizzonte. L'oscurità ha coperto la maggior parte del cielo a causa del potente effetto di lente gravitazionale del buco. Guarda lì, dove indica il mio puntatore; quella è la galassia 3C295. Prima che cominciaste la vostra discesa era in posizione orizzontale, 90 gradi rispetto allo zenit. Ma qui vicino all'orizzonte di Gargantua la gravità del buco esercita un'attrazione così forte sui raggi luminosi da essa provenienti che li distorce da una posizione orizzontale a una quasi verticale. Di conseguenza la 3C295 sembra trovarsi quasi al di sopra di noi».

Rassicurati, proseguite la discesa. La console mostra l'andamento della nave in termini sia di distanza radiale (verso il basso) percorsa, sia della circonferenza di un cerchio attorno al buco che passa per il punto in cui vi trovate. Nelle fasi iniziali della discesa, a ogni chilometro di distanza radiale percorso la vostra circonferenza diminuiva di 6,283185307... chilometri. Il rapporto tra la riduzione della circonferenza e la riduzione del raggio era pari a 6,283185307 chilometri/1 chilometro che equivale a 2π, proprio come previsto dalla formula standard di Euclide per le circonferenze. Ma ora che la nave si avvicina all'orizzonte questo rapporto sta diventando più piccolo di 2π: è 5,960752960 per circonferenze 10 volte quella dell'orizzonte, 4,442882938 per le circonferenze 2 volte l'orizzonte, 1,894451650 per circonferenze 1,1 volte l'orizzonte, 0,625200306 per circonferenze 1,01 volte l'orizzonte. Queste deviazioni dalla geometria euclidea standard che i ragazzi imparano a scuola sono possibili solo in uno spazio curvo; state vedendo la curvatura dello spazio che secondo la relatività generale di Einstein deve accompagnare la forza di marea del buco[31].

Nella fase finale della discesa della vostra nave, Kares dà sempre più potenza ai motori per rallentarne la caduta. Infine, la nave rimane in stallo, sospesa su un'orbita 1,0001 volte la circonferenza dell'orizzonte, mantenendo un'accelerazione pari a 10-*g* per resistere alla potente attrazione gravitazionale del buco. Durante l'ultimo chilometro radiale del suo percorso, la circonferenza diminuisce solo di 0,062828712 chilometri.

Lottando contro la dolorosa forza di 10-*g* per sollevare le mani, il vostro equipaggio punta le apparecchiature telescopiche e realizza una lunga sessione fotografica. A parte una manciata di deboli radiazioni provocate attorno a voi dal gas che precipita e si scontra surriscaldandosi, le sole onde elettromagnetiche fotografabili sono quelle provenienti dall'apertura luminosa in alto. L'apertura è piccola, appena tre gradi di arco di diametro, sei volte le dimensioni del Sole visto dalla Terra. Ma in essa sono compresse le immagini di tutte le stelle che orbitano attorno a Gargantua e di tutte la galassie dell'Universo. Al centro esatto vi sono le galassie che si trovano effettivamente sopra di voi. Il cinquantacinque per cento dello spazio compreso tra il centro dell'apertura e il suo margine è occupato da galassie come la 3C295 che, se non fosse per l'effetto di lente del buco, sarebbero in posizione orizzontale, a 90 gradi dallo zenit. Il trentacinque per cento è occupato da galassie che sapete trovarsi in realtà sul lato opposto del buco, proprio sotto di voi. Il trenta per cento più lontano dell'apertura contiene una seconda immagine di ogni galassia, e il due per cento più lontano una terza immagine!

In modo altrettanto sorprendente, i colori di tutte le stelle e le galassie sono sbagliati. Una galassia che sapete essere in realtà verde, presenta un bagliore di tenui raggi X: la gravità di Gargantua, attirando verso il basso la radiazione della galassia, le ha conferito maggiore energia riducendone la lunghezza d'onda da $5x10^{-7}$ metri (verde) a $5x10^{-9}$ (raggi X).

Analogamente, il disco esterno del quasar 3C273 che sapete emettere raggi infrarossi della lunghezza d'onda di $5x10^{-5}$ sembra brillare di una luce verde di $5x10^{-7}$ metri.

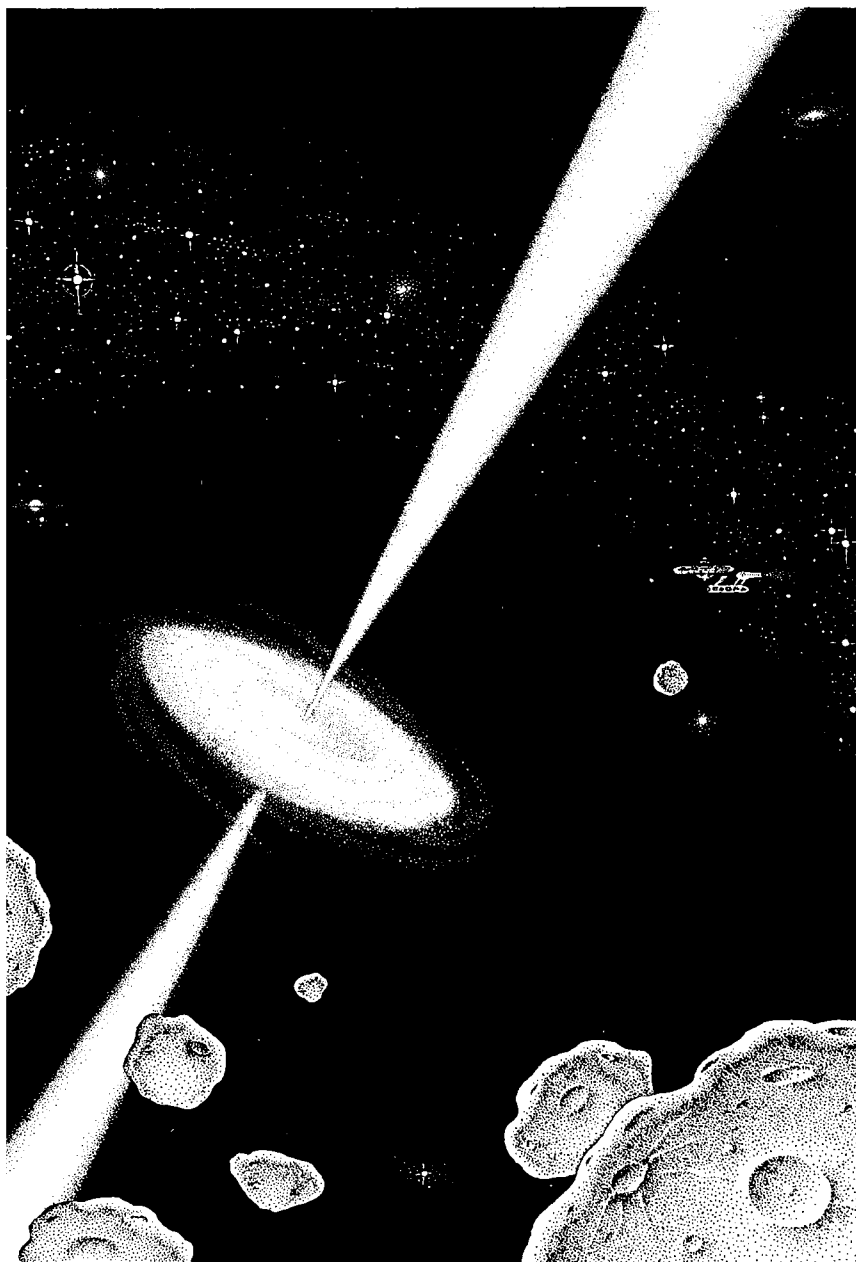
Dopo aver registrato attentamente tutti i dati dell'apertura soprastante, rivolgete la vostra attenzione all'interno della vostra nave spaziale. Non sareste sorpresi se qui, così vicino all'orizzonte del buco, le leggi della fisica subissero qualche modifica, e se tali modifiche influissero sulla vostra fisiologia. Invece no. Osservate il primo ufficiale, Kares, che appare normale; osservate il secondo ufficiale, Bret, e anche lui appare normale. Vi toccate; vi sentite normali. Bevete un bicchiere d'acqua, a parte gli effetti dell'accelerazione di 10-*g*, l'acqua scende normalmente. Kares attiva un laser a ioni di argon; esso produce la stessa luce verde brillante di sempre. Bret attiva e disattiva un laser a rubino e misura il tempo impiegato dal lampo di luce ad andare e tornare dal laser a uno specchio; in base a questa misurazione calcola la velocità della luce lungo il tragitto. Il risultato è assolutamente identico a quello che si otterrebbe in un laboratorio ubicato sulla Terra: 299.792 chilometri al secondo.

Tutto all'interno della nave è normale, assolutamente come se fosse adagiata sulla superficie di un pianeta massivo con una gravità di 10-*g*. Se non guardaste fuori della nave e non vedeste la bizzarra apertura sopra di voi e l'oscurità che vi circonda da ogni parte non sapreste, o quasi, di trovarvi molto vicini all'orizzonte di un buco nero anziché al sicuro sulla superficie di un pianeta. Il buco curva lo spaziotempo all'interno come all'esterno della nave spaziale, e con degli strumenti sufficientemente precisi potreste rilevare questa curvatura; ad esempio attraverso la trazione esercitata sulla vostra testa e sui vostri piedi dalla forza di marea. Ma sebbene la curvatura sia enormemente importante sulla scala dei 300.000 miliardi di chilometri della circonferenza dell'orizzonte, i suoi effetti sono minuscoli sulla scala di un chilometro della vostra nave spaziale; la curvatura provocata dalla forza di marea tra un'estremità e l'altra della nave è appena la centomillesima parte di un miliardesimo (10^{-14} *g*) della gravità terrestre, e tra la vostra testa e i vostri piedi è mille volte più piccola!

Per esaminare ulteriormente questa sorprendente normalità, Bret spedisce fuori della nave una capsula dotata di un'apparecchiatura laser a impulsi

e di uno specchio per misurare la velocità della luce. Mentre la capsula precipita verso l'orizzonte, lo strumento misura la velocità con cui gli impulsi luminosi percorrono la distanza tra il laser a prua e lo specchio a poppa e viceversa. Un computer a bordo della capsula trasmette i risultati mediante un raggio laser alla nave: «299.792 chilometri al secondo; 299.792; 299.792; 299.792...». Poi il raggio laser si interrompe. La capsula ha varcato l'orizzonte senza che si verificasse alcun cambiamento per quanto riguarda la velocità della luce al suo interno, né per quanto riguarda le leggi della fisica che regolano il funzionamento delle sue apparecchiature elettroniche.

Questi risultati sperimentali vi sono molto graditi. Agli inizi del XX secolo, Albert Einstein aveva affermato, su basi essenzialmente filosofiche, che le leggi locali della fisica (quelle che vigono in regioni così piccole da permettere di ignorare la curvatura dello spaziotempo) dovrebbero essere le stesse in ogni parte dell'Universo. Questa affermazione è stata consacrata come un principio fondamentale della fisica, il *principio di equivalenza*[32]. Spesso, nei secoli successivi, il principio di equivalenza era stato sottoposto a test sperimentali, ma non era mai stato verificato in modo così vivido e completo come negli esperimenti da voi effettuati sull'orizzonte di Gargantua.

Voi e il vostro equipaggio cominciate a essere stanchi di lottare contro le 10 gravità terrestri, e quindi vi preparate per la prossima e ultima fase del vostro viaggio, il ritorno nella Via Lattea. L'equipaggio, nelle prime fasi del rientro, invierà una relazione sulle vostre esplorazioni su Gargantua, e poiché la vostra nave spaziale starà ben presto viaggiando quasi alla velocità della luce, le trasmissioni raggiungeranno la Via Lattea meno di un anno prima di essa, in base al calcolo terrestre del tempo. Mentre la nave spaziale risale allontanandosi da Gargantua, l'equipaggio effettua un attento studio telescopico del quasar 3C273 sopra di voi[33] (figura 5). I suoi getti – sottili flussi di gas rovente che schizzano fuori dal centro della quasar – sono enormi: tre milioni di anni luce di lunghezza. Puntando i telescopi sul centro, l'equipaggio vede la fonte da cui proviene l'energia dei getti: uno spesso anello rovente di gas di dimensioni inferiori a un anno luce con un buco nero al centro. L'anello, che gli astrofisici hanno chiamato «disco di accrezione», orbita intorno al buco nero. Misurandone il periodo di rotazione e la circonferenza, il vostro equipaggio stabilisce la massa che il buco deve avere: 2 miliardi (2×10^9) di masse solari, 7500 volte meno di Gargantua, ma molto più grande di qualsiasi buco presente nella Via Lattea. Un flusso di gas scorre dalla ciambella verso l'orizzonte attratto dalla gravità del buco. Avvicinandosi all'orizzonte, il flusso, diversamente da qualsiasi altro abbiate

5 – Il quasar 3C273: un buco nero di due miliardi di masse solari circondato da un anello di gas («disco di accrezione») e con due giganteschi getti emessi lungo l'asse di rotazione del buco.

visto, comincia a vorticare attorno al buco con un movimento simile a quello di un ciclone. Quel buco deve ruotare velocemente! L'asse di rotazione è facile da individuare; è l'asse attorno al quale vortica il flusso del gas. I due getti, osservate, vengono sparati lungo l'asse di rotazione. Essi hanno origine appena al di sopra dei poli nord e sud dell'orizzonte, dove traggono energia dalla rotazione del buco e dall'anello[34], analogamente a quanto fa un ciclone con la polvere sulla Terra.

Il contrasto tra Gargantua e 3C273 è sorprendente: perché Gargantua, con la sua massa e le sue dimensioni mille volte più grandi non è circondato da un anello di gas e non presenta giganteschi getti quasar? Bret, dopo un lungo esame telescopico, vi fornisce la risposta: a intervalli di pochi mesi una stella in orbita attorno al buco, di dimensioni più ridotte di 3C273 passa più vicina all'orizzonte e viene squarciata dalla forza di marea del buco. Le viscere della stella, circa un milione di masse solari, vengono espulse e sparse attorno al buco. Gradualmente, la frizione interna trascina i gas dispersi giù verso l'anello. Il nuovo gas compensa quello con cui l'anello alimenta costantemente il buco e i getti. In tal modo l'anello e i getti vengono ampiamente riforniti di gas e continuano a brillare.

Anche vicino a Gargantua passano delle stelle, spiega Bret. Ma dato che quest'ultimo è molto più grande di 3C273, la forza di marea all'esterno del suo orizzonte è troppo debole per squarciarle. Gargantua inghiotte le stelle tutte intere senza disperderne le viscere in un anello circostante. E privo di anello Gargantua non ha modo di produrre dei getti o altre violente manifestazioni tipiche dei quasar.

Mentre la nave spaziale continua a uscire dal campo gravitazionale di Gargantua, pianificate il viaggio di ritorno. Quando la nave avrà raggiunto la Via Lattea, la Terra sarà quattro miliardi di anni più vecchia di quando l'avete lasciata. I cambiamenti avvenuti nella società umana saranno talmente enormi che non volete tornarvi. Piuttosto, voi e il vostro equipaggio decidete di colonizzare lo spazio attorno a un buco nero rotante. Sapete che così come l'energia di rotazione del buco del 3C273 fornisce energia ai getti del quasar, l'energia di rotazione di un buco più piccolo può essere una fonte di energia per l'umanità.

Non volete raggiungere qualche buco nero scelto a caso e poi scoprire che altri esseri hanno già costruito una civiltà attorno a esso, perciò, invece di dirigere la vostra nave verso un buco già esistente che ruota velocemente, puntate su un sistema stellare che darà origine a un buco del genere poco dopo il vostro arrivo.

Nella Nebulosa di Orione, all'interno della Via Lattea, all'epoca della vostra partenza dalla Terra, c'era un *sistema stellare binario* composto da due stelle di 30 masse solari orbitanti l'una intorno all'altra. DAWN ha calcolato che ognuna di queste due stelle dovrebbe essere implosa mentre eravate diretti verso Gargantua per dare vita a un buco non rotante di 24 masse solari (6 masse solari di gas sono state emesse durante l'implosione). Questi due buchi di 24 masse solari ora dovrebbero girare l'uno intorno all'altro come un buco nero binario, e nel loro moto circolare dovrebbero emettere delle piccole onde di forza di marea (piccole onde di «curvatura spaziotemporale») dette *onde gravitazionali*[35]. Queste onde gravitazionali dovrebbero esercitare un riflusso sul sistema binario, esattamente come una pallottola produce il rinculo dell'arma che la spara, e questo rinculo dell'onda gravitazionale dovrebbe spingere i buchi in una lenta ma inesorabile spirale a rientrare. Con una lieve modifica dell'accelerazione della vostra nave spaziale potete fare in modo di arrivare sul posto in coincidenza con lo stadio finale della spirale verso l'interno: alcuni giorni dopo il vostro arrivo vedrete gli orizzonti dei buchi non rotanti vorticare l'uno intorno all'altro, sempre più vicini, sempre più veloci, fino a fondersi dando luogo a un unico e più vasto orizzonte rotante, vorticante.

Dato che i due buchi originari non ruotano, nessuno di essi da solo può offrire un'efficiente fonte di energia per la vostra colonia. Invece, il buco neonato, con la sua rapida rotazione, sarà ideale!

Casa

Dopo un viaggio di 42 anni, la vostra nave spaziale finalmente rallenta nella Nebulosa di Orione, dove DAWN ha previsto che si trovino i due buchi. Eccoli lì, proprio nel punto esatto! Misurando il moto orbitale degli atomi interstellari mentre precipitano nei buchi, constatate che i loro orizzonti non stanno ruotando e che ciascuno di essi pesa 24 masse solari, proprio come previsto da DAWN. Ogni orizzonte ha una circonferenza di 440 chilometri; essi distano 30.000 chilometri e orbitano l'uno intorno all'altro una volta ogni 13 secondi. Dopo aver inserito questi numeri nelle formule della relatività generale riguardanti il rinculo dell'onda gravitazionale, giungete alla conclusione che i due buchi dovrebbero fondersi entro sette giorni a partire da ora. C'è appena il tempo sufficiente affinché il vostro equipaggio prepari le sue telecamere telescopiche e registri i particolari. Fotografando l'anello

brillante di luce stellare concentrata che circonda il disco di ciascun buco nero, potranno seguire facilmente il moto dei buchi.

Volete essere abbastanza vicini da vedere distintamente, ma abbastanza lontani da trovarvi al sicuro dalle forze di marea dei buchi. Stabilite che l'ubicazione opportuna si trova su un'orbita dieci volte più ampia di quella in cui i due buchi girano l'uno intorno all'altro – un diametro orbitale di 300.000 chilometri e una circonferenza orbitale di 940.000 chilometri. Kares effettua le manovre necessarie e immette la nave spaziale su quell'orbita, e l'equipaggio inizia le sue osservazioni telescopiche e fotografiche.

Nei sei giorni successivi i due buchi si avvicinano gradualmente e accelerano il loro moto orbitale. Un giorno prima della fusione la distanza tra loro si è ridotta da 30.000 a 18.000 chilometri e il loro periodo orbitale da 13 a 6,3 secondi. Un'ora prima della fusione distano tra loro 8400 chilometri e il loro periodo orbitale è di 1,9 secondi. Un minuto prima della fusione: distanza 3000 chilometri, periodo 0,41 secondi. Dieci secondi prima: distanza 1900 chilometri, periodo 0,21 secondi.

Poi, negli ultimi dieci secondi, voi e la vostra nave spaziale cominciate a sentirvi scuotere, prima leggermente, poi in modo sempre più violento. È come se due mani gigantesche vi avessero afferrato la testa e i piedi comprimendoli e stirandoli alternativamente sempre più forte e sempre più rapidamente. Poi, più improvvisamente di come era iniziato, lo scuotimento cessa. Tutto è tranquillo.

«Che cosa è stato?», mormorate a DAWN con voce tremante.

«Tikhii, tikhii», risponde rassicurante. «Era l'ondeggiare della forza di marea provocata dalle onde gravitazionali generate dalla fusione dei buchi. Siete abituati a delle onde gravitazionali così deboli che solo strumenti estremamente sensibili riescono a percepire la loro forza di marea. Ma qui, vicino ai buchi che si fondevano, esse avevano una forza enorme, talmente grande che se avessimo collocato la nostra nave spaziale su un'orbita trenta volte più piccola sarebbe stata fatta a pezzi dalle onde. Ma adesso siamo al sicuro. La fusione è avvenuta e le onde sono finite, stanno viaggiando nell'Universo e recano ad astronomi lontani una descrizione sinfonica di questa fusione»[36].

Puntando uno dei telescopi dell'equipaggio sulla fonte di gravità sotto di voi, vedete che DAWN ha ragione, la fusione è stata completata. Dove prima c'erano due buchi ora ce n'è uno solo, e ruota velocemente, come potete vedere dal vorticare dagli atomi che vi precipitano dentro. Questo buco sarà un generatore di energia ideale per il vostro equipaggio e per migliaia di generazioni di loro discendenti.

Dalla misurazione dell'orbita della vostra nave spaziale, Kares deduce che il buco pesa 45 masse solari. Dato che i buchi che lo hanno generato pesavano in totale 48, 3 masse solari sono state convertite in energia pura e trasportate via dalle onde gravitazionali. Non c'è da stupirsi se vi hanno scosso con tanta forza!

Puntando i telescopi sul buco, un piccolo oggetto sfreccia inaspettatamente accanto alla nave spargendo diffusamente scintille brillanti in tutte le direzioni e poi esplode aprendo una falla su un fianco del vostro scafo. L'equipaggio e i robot, perfettamente addestrati, si precipitano ai posti di combattimento, cercate invano di individuare la nave da guerra che vi sta attaccando, poi, rispondendo a un vostro appello, DAWN annuncia rassicurante dagli altoparlanti della nave: «Tikhii, tikhii, non ci stanno attaccando. Era solo un bizzarro buco nero primordiale che è evaporato e poi è esploso»[37].

«Un che!?», esclamate.

«Un buco nero primordiale, che è evaporato e poi si è distrutto in un'esplosione», ripete DAWN.

«Spiegati», chiedete. «Cosa intendi per *primordiale*? Cosa vuoi dire con *evaporato* e *esploso*? Stai dicendo cose senza senso. Le cose possono cadere dentro un buco nero, ma niente può mai uscirne; niente può "evaporare". E un buco nero esiste per sempre; si espande sempre, non si riduce mai. Un buco nero non può "esplodere" e distruggersi in nessun modo. È assurdo».

Paziente come al solito, DAWN vi istruisce. «Gli oggetti di grandi dimensioni, come gli esseri umani, le stelle e i buchi neri formati dall'implosione di una stella sono governati dalle leggi della fisica *classica*», spiega la macchina, «dalle leggi del moto di Newton, dalle leggi della relatività di Einstein, e così via. Invece, gli oggetti piccoli, ad esempio gli atomi, le molecole e i buchi neri più piccoli di un atomo, sono governati da un insieme assai diverso di leggi, le leggi della fisica *quantistica*[38]. Mentre le leggi classiche impediscono a un buco nero di dimensioni normali di evaporare, ridursi, esplodere o distruggersi, non è così per le leggi quantistiche. Esse prevedono che qualsiasi buco nero delle dimensioni di un atomo evapori gradualmente e si riduca fino a raggiungere una circonferenza di dimensioni estremamente piccole, all'incirca come il nucleo di un atomo. Il buco, che malgrado le sue minuscole dimensioni pesa circa un miliardo di tonnellate, deve allora distruggersi con un'enorme esplosione. Quest'ultima converte la sua massa da un miliardo di tonnellate in energia che si diffonde, con una potenza mille miliardi di volte superiore alla più potente esplosione nucleare provocata dagli esseri umani sulla Terra nel XX secolo. È proprio un'esplosione del genere ad aver danneggiato adesso la nostra nave», spiega DAWN.

«Ma non dovete preoccuparvi che ce ne siano altre», aggiunge. «Esplosioni del genere sono eccezionalmente rare perché i buchi neri minuscoli sono a loro volta estremamente rari. L'unico ambiente in cui sono stati creati dei buchi neri minuscoli è stato quello del Big Bang che ha portato alla nascita del nostro Universo, quindici miliardi di anni fa; per questo vengono chiamati buchi *primordiali.* Il Big Bang ne ha creati solo pochi, e quei pochi sono andati evaporando e riducendosi lentamente fin dalla loro nascita. Ogni tanto, molto raramente, uno di essi si riduce fino alle sue dimensioni critiche ed esplode[39]. È stato solo per caso – un evento estremamente improbabile – che un buco del genere si sia distrutto esplodendo accanto alla nostra nave, ed è estremamente improbabile che ne incontriamo un altro».

Sollevati, ordinate all'equipaggio di riparare la nave mentre voi e i vostri colleghi intraprendete lo studio telescopico del buco di 45 masse solari e in rapida rotazione che si trova sotto di voi.

La rotazione del buco appare evidente per via non solo del vorticoso precipitare degli atomi, ma anche della forma della macchia nera dal bordo luminoso che disegna nel cielo a voi sottostante: essa è schiacciata come una zucca, rigonfia all'equatore e appiattita ai poli. La forza centrifuga della rotazione del buco determina il rigonfiamento e gli appiattimenti[40]. Ma il rigonfiamento non è simmetrico, sembra più ampio sul margine destro del disco – che si allontana da voi mentre l'orizzonte ruota – che su quello sinistro. DAWN spiega che dipende dal fatto che l'orizzonte può catturare raggi di luce stellare più facilmente se procedono verso di voi lungo il suo margine destro, in direzione contraria a quella di rotazione, che non lungo quello sinistro, nella stessa direzione della rotazione.

Misurando la forma della macchia e confrontandola con le formule della relatività generale riguardanti i buchi neri, Bret deduce che il momento angolare della rotazione del buco è pari al 96% del massimo consentito a un buco della sua massa. E in base al momento angolare e alla massa del buco, 45 volte superiore a quella del Sole, calcolate altre sue caratteristiche, compresa la velocità di rotazione del suo orizzonte, 270 rivoluzioni al secondo, e la sua circonferenza equatoriale, 533 chilometri.

La rotazione del buco vi affascina. Non avete mai potuto osservarla prima così da vicino. Quindi, con qualche rimorso, chiedete e ottenete un robot volontario che vada a esplorare le vicinanze dell'orizzonte e riferisca sulle sue esperienze. Impartite al robot, che si chiama Kolob, istruzioni precise:

«Scendi fino a dieci metri sopra l'orizzonte e accendi i tuoi propulsori per mantenerti in posizione di stallo, sospeso esattamente sotto la nave. Usa i propulsori per resistere sia all'attrazione gravitazionale verso il basso sia al movimento vorticoso dello spazio».

Desideroso d'avventura, Kolob esce dal ventre della nave e si tuffa giù accendendo i propulsori, prima piano, poi dando più gas per resistere al vortice spaziale e restare esattamente sotto la nave. All'inizio Kolob non incontra problemi. Ma quando raggiunge una circonferenza di 833 chilometri più ampia del 56% rispetto a quella dell'orizzonte, il suo raggio laser trasmette il messaggio: «Non posso resistere al vortice; non posso; non posso!», e come una pietra sollevata da un ciclone viene trascinato in un'orbita circolare intorno al buco[41].

«Non preoccuparti», rispondete. «Fai solo del tuo meglio per resistere al vortice e continua a scendere finché non sei dieci metri sopra l'orizzonte».

Kolob obbedisce. Mentre scende viene trascinato in un moto circolare sempre più veloce. Infine, quando arresta la sua discesa e resta sospeso dieci metri sopra l'orizzonte, circumnaviga il buco quasi in perfetta sincronia con l'orizzonte stesso, 270 giri al secondo. Per quanto dia gas non riesce in nessun modo a opporsi a questo movimento. Il vortice spaziale non gli consente di fermarsi.

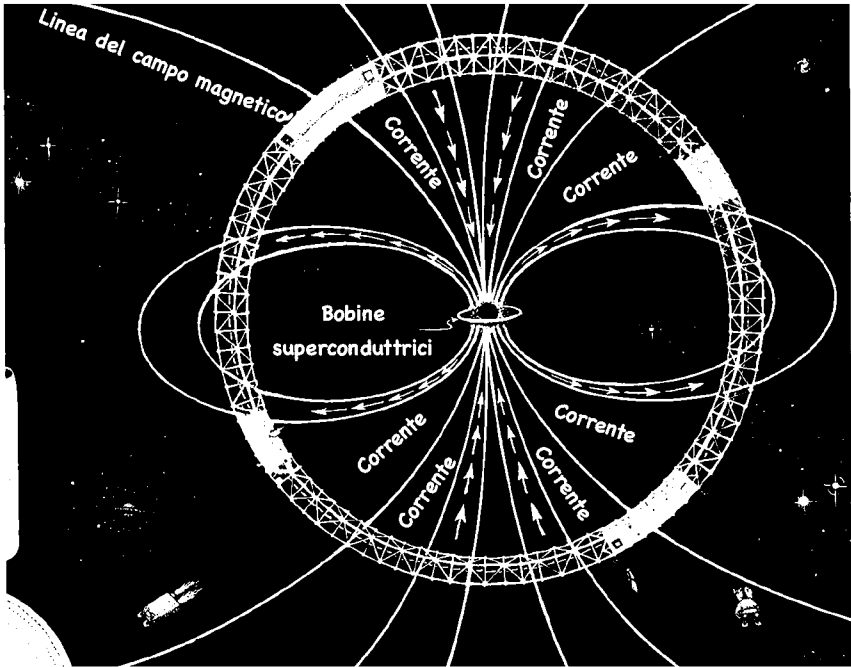
«Aziona il propulsore in direzione opposta», ordinate. «Se non puoi girare più lentamente, prova a farlo piu velocementè».

Kolob ci prova. Aziona il propulsore, sempre restando dieci metri sopra l'orizzonte, ma provando a procedere più velocemente di prima. Malgrado esso avverta la consueta accelerazione prodotta dal suo propulsore, non notate alcun cambiamento nel suo moto. Circumnaviga ancora il buco 270 volte al secondo. Poi, prima che possiate trasmettergli ulteriori istruzioni, finisce il carburante e inizia a precipitare verso il basso; il suo laser sfreccia lungo lo spettro elettromagnetico passando dal verde al rosso, all'infrarosso, alle onde radio, e poi diventa nero, senza alcun cambiamento nel suo moto circolare. È andato, giù nel buco, a picco verso la violenta singolarità che voi non vedrete mai.

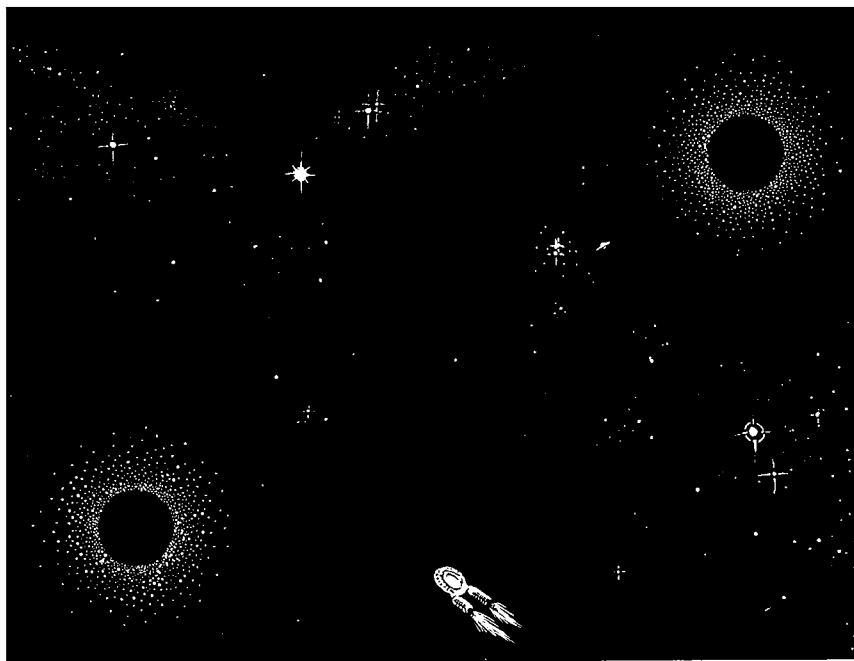
Dopo tre settimane di cordoglio, esperimenti e studi telescopici, il vostro equipaggio comincia a dedicarsi al futuro. Dopo aver prelevato materiali dai pianeti lontani costruisce una struttura ad anello intorno al buco. L'anello ha una circonferenza di 5 milioni di chilometri, uno spessore di 552 chilometri e un'ampiezza di 4000 chilometri. Compie due rotazioni all'ora, esat-

tamente il ritmo sufficiente affinché la forza centrifuga controbilanci l'attrazione gravitazionale esercitata dal buco sullo strato centrale dell'anello, a 272 chilometri di distanza tra il lato interno e quello esterno. Le sue dimensioni sono state scelte con cura in modo che coloro che preferiscono vivere con una gravità pari a quella terrestre possano collocare le loro abitazioni vicino al lato interno o a quello esterno dell'anello, e coloro che ne preferiscono una minore possano vivere più vicino al centro. Queste differenze di gravità sono dovute in parte alla forza centrifuga prodotta dalla rotazione dell'anello e in parte alla forza di marea del buco – o, per usare i termini di Einstein, alla curvatura dello spaziotempo.

L'energia elettrica che riscalda e illumina questo mondo di forma anulare viene ottenuta dal buco nero: il 20% della massa del buco è costituito da energia immagazzinata nel vortice spaziale esterno, ma prossimo, all'orizzonte[42]. Questa energia è 10.000 volte superiore a quella che il Sole irradierà sotto forma di luce e di calore in tutta la sua esistenza! E poiché si trova al di fuori dell'orizzonte, può essere sfruttata. Non importa se la strumentazione di cui il mondo a forma di anello dispone a questo fine ha solo un'efficienza del 50%; esso può pur sempre contare su una fonte di energia 5000 volte più grande del Sole.

L'estrattore di energia funziona in base allo stesso principio dei quasar[43]: l'equipaggio ha dispiegato un campo magnetico attraverso l'orizzonte e lo mantiene al di sopra del buco malgrado la sua tendenza ad affievolirsi, grazie a delle bobine superconduttrici giganti (figura 6). L'orizzonte, ruotando, trascina lo spazio circostante in un vortice simile a un ciclone, che a sua volta interagisce con il campo magnetico dispiegato a formare un gigantesco generatore di energia elettrica. Le linee del campo magnetico fungono da linee di trasmissione dell'energia. La corrente elettrica viene condotta fuori dall'equatore del buco (sotto forma di elettroni che fluiscono verso l'interno) e su per le linee del campo magnetico fino al mondo ad anello, dove la corrente deposita la sua energia. Poi scorre fuori dell'anello lungo un'altra serie di linee del campo magnetico e si dirige in basso verso i poli nord e sud del buco (sotto forma di positroni che fluiscono verso l'interno). Regolando l'intensità del campo magnetico, gli abitanti del mondo possono regolare la produzione di energia: un campo debole e poca energia nei primi anni di esistenza del mondo; un campo forte e un'elevata energia negli anni successivi. Gradualmente, man mano che l'energia viene estratta, il buco rallenta la sua rotazione, ma occorreranno molti eoni prima di esaurire l'enorme riserva di energia prodotta dalla rotazione del buco.

6 – Una città su una struttura ad anello attorno a un buco nero rotante e il sistema elettromagnetico mediante il quale essa estrae energia dalla rotazione del buco.

Il vostro equipaggio e innumerevoli generazioni di loro discendenti possono chiamare questo mondo artificiale «casa» e usarlo come base per future esplorazioni dell'Universo. Ma voi no. Voi sentite la mancanza della Terra e degli amici che vi siete lasciati dietro, e che devono ormai essere morti da quattro miliardi di anni. La mancanza che provate è così forte che siete pronti a rischiare l'ultimo quarto della vostra vita normale, che ha una durata di duecento anni, in un tentativo rischioso se non temerario di tornare all'epoca meravigliosa della vostra giovinezza.

Il viaggio nel tempo verso il futuro è relativamente facile, come ha dimostrato il vostro viaggio tra i buchi neri. Non lo è altrettanto viaggiare nel passato. In effetti, un simile viaggio potrebbe essere assolutamente vietato dalle leggi fondamentali della fisica. Tuttavia, DAWN vi riferisce di alcune ipotesi risalenti al XX secolo, secondo cui il viaggio indietro nel tempo potrebbe essere possibile sfruttando un'ipotetica deformazione dello spazio chiamata cunico-

7 – Le due bocche di un ipotetico cunicolo temporale. Entrando da una qualsiasi delle bocche si esce dall'altra dopo aver percorso un breve tubo (la gola del cunicolo) che non si estende nel nostro Universo, ma nell'iperspazio.

lo temporale[44]. Questa deformazione dello spazio consiste in due fori di entrata (le *bocche* del cunicolo temporale) che somigliano a dei buchi neri, ma privi di orizzonte e che possono trovarsi in punti molto distanti tra loro dell'Universo (figura 7). Qualsiasi cosa entri in una bocca viene a trovarsi in un tubo molto corto (la *gola* del cunicolo) che conduce fino all'altra bocca e fuori di essa. Il tubo non può essere visto dal nostro Universo perché si estende nell'*iperspazio* anziché nello spazio normale. DAWN spiega che attraverso il cunicolo il tempo potrebbe seguire una concatenazione diversa rispetto a quella del nostro Universo. Attraversando il cunicolo in una direzione, ad esempio dalla bocca di sinistra a quella di destra, si potrebbe andare indietro nel tempo nel nostro Universo, mentre procedendo nella direzione opposta, da destra a sinistra, si potrebbe andare avanti. Un cunicolo di questo genere costituirebbe una deformazione del tempo, oltre che dello spazio.

Le leggi della gravità quantistica prevedono l'esistenza di cunicoli temporali di questo tipo estremamente piccoli[45], dice DAWN. Questi cunicoli temporali quantistici devono essere così minuscoli, delle dimensioni di appena 10^{-33} centimetri, da avere un'esistenza effimera, troppo breve, 10^{-43} secondi, per poterli usare per un viaggio nel tempo. Essi devono apparire e scomparire in un lampo, in modo casuale, imprevedibile: qui, lì, e ovunque. In modo del tutto occasionale potrebbe spuntare all'improvviso un cunicolo temporale con una bocca vicina al mondo ad anello, oggi, e l'altra vicina alla Terra nell'epoca in cui avete intrapreso il vostro viaggio, quattro miliardi di anni fa. DAWN vi propone di cercare di afferrare un simile cunicolo al primo baluginio, di allargarlo come farebbe un bambino quando gonfia un palloncino e di tenerlo aperto abbastanza a lungo per viaggiare attraverso di esso fino al luogo della vostra giovinezza.

Ma DAWN vi avverte di un grosso pericolo. I fisici hanno ipotizzato, ma non è mai stato provato, che un istante prima di trasformarsi in una macchina del tempo il cunicolo debba autodistruggersi in un gigantesco lampo esplosivo. In questo modo, l'Universo potrebbe proteggersi dai paradossi del viaggio nel tempo, come quello di un uomo che torni indietro nel tempo e uccida la propria madre prima che lo abbia concepito, impedendosi in tal modo di nascere e di uccidere sua madre[46].

Se l'ipotesi dei fisici è errata DAWN potrebbe essere in grado di tenere aperto il cunicolo per qualche secondo con una gola abbastanza grande da permettervi di compiere il viaggio nel tempo. Aspettando accanto al computer che esso allarghi il cunicolo temporale e tuffandovici dentro arriverete in una frazione di secondo del vostro tempo sulla Terra all'epoca della vostra giovinezza, quattro miliardi di anni fa. Ma se la macchina del tempo si autodistrugge, sarete distrutti anche voi. Decidete di correre il rischio…

Quanto precede suona come un racconto di fantascienza. In effetti in parte lo è: non posso garantire in nessun modo che esista un buco nero di dieci masse solari vicino a Vega o un buco di un milione di masse solari al centro della Via Lattea, o un buco nero di 15.000 miliardi di masse solari in una parte qualsiasi dell'Universo; sono tutte invenzioni ipotetiche, ma plausibili. Né posso garantire che gli esseri umani riescano a sviluppare la tecnologia necessaria per i viaggi intergalattici, o quanto meno interstellari, o per costruire dei mondi ad anello su delle impalcature che circondano un buco nero. Anche in questo caso si tratta di finzioni ipotetiche.

Per altro verso, posso garantirvi con notevole, anche se non completa,

certezza che i buchi neri esistono nel nostro Universo e presentano esattamente le caratteristiche descritte nel precedente racconto. Se sfruttando il getto dei motori vi trovate sospesi in una nave spaziale appena sopra l'orizzonte di un buco di 15.000 masse solari, vi garantisco che le leggi della fisica a bordo saranno le stesse della Terra, e che quando osserverete i cieli intorno a voi vedrete l'intero Universo scintillare sotto di voi in un piccolo, brillante disco di luce. Vi garantisco che se mandate un robot cavia nelle vicinanze dell'orizzonte di un buco rotante, per quanto gas possa dare ai suoi propulsori, esso non riuscirà mai a muoversi avanti o indietro a una velocità diversa da quella della rotazione del buco (270 giri al secondo, nel mio esempio). Vi garantisco che un buco rotante può immagazzinare fino al 29% della sua massa sotto forma di energia rotazionale, e che se si è abbastanza abili e intelligenti si può estrarre e utilizzare tale energia.

Come posso garantire queste cose con notevole certezza? Dopo tutto, non ho mai visto un buco nero. Nessuno lo ha visto. Gli astronomi hanno trovato solo prove indirette della loro esistenza[47] e nessuna prova basata sull'osservazione delle caratteristiche loro attribuite. Come posso essere così audace da dare tante garanzie su di esse? Per una semplice ragione. Così come le leggi della fisica prevedono l'andamento delle maree dell'oceano sulla Terra, l'ora e il livello di ogni alta marea, esse, se le intendiamo correttamente, prevedono, in maniera inequivocabile, che i buchi neri abbiano tali proprietà. In base alla formulazione di Newton delle leggi della fisica si può dedurre attraverso calcoli matematici la sequenza delle maree sulla Terra per il 1999 o per il 2010; analogamente, in base alla formulazione di Einstein delle leggi della relatività generale, è possibile dedurre, attraverso calcoli matematici, tutto quello che c'è da sapere sulle proprietà dei buchi neri, dall'orizzonte in poi.

E perché ritengo che la formulazione delle leggi fondamentali della fisica data dalla relatività generale di Einstein sia molto precisa? Dopo tutto, sappiamo che le formulazioni di Newton smettono di essere precise in prossimità di un buco nero.

Le formulazioni valide delle leggi fondamentali recano in sé una chiara indicazione del punto in cui cesseranno di essere applicabili[48]. La formulazione di Newton ci dice essa stessa che probabilmente non sarà più applicabile nelle vicinanze di un buco nero (anche se abbiamo appreso solo nel XX secolo a leggere in essa tale conclusione). Analogamente, la formulazione data dalla relatività generale di Einstein manifesta fiducia in se stessa al di fuori di un buco nero, all'orizzonte del buco, e al suo interno fin quasi (ma non del tutto) alla singolarità che si trova al centro di esso. Questo è uno dei

motivi che mi rende fiducioso circa le previsioni della relatività generale. Un altro è il fatto che, malgrado le previsioni della relatività generale sui buchi neri non siano ancora state verificate direttamente, sono stati effettuati test di alta precisione su altri suoi aspetti sulla Terra, nel Sistema Solare e nei sistemi binari che contengono stelle esotiche e compatte chiamate pulsar. La relatività generale ha brillantemente superato ognuno di questi test.

Negli ultimi trent'anni ho partecipato alla ricerca nel campo della fisica teorica che ci ha fornito quanto attualmente sappiamo sui buchi neri, e alla ricerca volta a verificare le previsioni sui buchi neri attraverso le osservazioni astronomiche. Il mio contributo è stato modesto, ma insieme ai miei colleghi fisici e astronomi ho goduto dell'eccitazione della ricerca e mi sono meravigliato per la conoscenza che ha prodotto. Questo libro rappresenta il mio tentativo di trasmettere almeno in parte questa sensazione di eccitazione e di meraviglia a coloro che non sono esperti di astronomia o di fisica.

I. LA RELATIVITÀ DELLO SPAZIO E DEL TEMPO

Dove Einstein demolisce la concezione di Newton dello spazio e del tempo come assoluti

13 aprile 1901

Professor Wilhelm Ostwald
Università di Lipsia
Lipsia, Germania

Stimato Herr Professor!

La prego di perdonare un padre tanto audace da rivolgersi a lei, stimato Herr Professor, nell'interesse di suo figlio.

Comincerò col dirle che mio figlio ha ventidue anni, che ha studiato al Politecnico di Zurigo per quattro anni, e che ha superato brillantemente gli esami di matematica e fisica la scorsa estate. Dopo di allora, ha tentato senza successo di ottenere un incarico di assistente, che gli consentirebbe di proseguire gli studi in fisica teorica e sperimentale. Tutti coloro che si trovano in una posizione tale da poter esprimere giudizi a riguardo, lodano il suo talento; in ogni caso, posso assicurare che è straordinariamente studioso e diligente e che si applica con grande passione alla sua scienza.

Mio figlio è pertanto profondamente infelice per non aver potuto accedere a un simile incarico, e l'idea di non poter proseguire la sua carriera e di averne ormai perso ogni opportunità si rafforza in lui ogni giorno di più. Inoltre, è afflitto dall'idea di essere di peso a noi, gente di modesta condizione.

Poiché è lei, stimatissimo Herr Professor, che mio figlio sembra ammirare e stimare più di ogni altro studioso oggi attivo nel campo della fisica, è a lei che mi sono preso la libertà di rivolgermi con l'umile richiesta di leggere il suo articolo pubblicato sugli «Annalen der Physik» e di scrivergli,

se possibile, qualche parola di incoraggiamento, affinché possa ritrovare la gioia di vivere e dedicarsi al suo lavoro.

Se, inoltre, potesse procurargli un incarico di assistente per questo periodo o per il prossimo autunno, le sarei infinitamente grato.

La prego ancora di scusarmi per l'impudenza con la quale le scrivo e mi prendo inoltre la libertà di dirle che mio figlio non sa nulla di questa mia inusuale iniziativa.

Con i sensi, stimatissimo Herr Professor, della più alta considerazione, il suo devoto

Hermann Einstein

Era in effetti un periodo di depressione per Albert Einstein. Era rimasto disoccupato per otto mesi da quando si era laureato al Politecnico di Zurigo all'età di ventuno anni e si sentiva un fallito.

Al Politecnico (abitualmente chiamato ETH dall'acronimo in tedesco) aveva studiato con alcuni dei più famosi fisici e matematici del mondo, ma non si era trovato bene con loro. Nel mondo accademico degli inizi del XX secolo, in cui la maggior parte dei Professori (con la P maiuscola) chiedevano e si aspettavano rispetto, Einstein ne mostrava poco. Fin dall'infanzia si era mostrato poco accondiscendente verso l'autorità, facendo sempre domande, non accettando mai niente senza prima averne verificato di persona la validità. «Il rispetto acritico è il peggior nemico della verità», egli affermava. Heinrich Weber, il più famoso dei suoi due professori di fisica all'ETH, si lamentava esasperato: «Sei un ragazzo intelligente, Einstein, molto intelligente. Ma hai un grave difetto: non ti lasci dire mai niente». L'altro professore di fisica, Jean Pernet, gli chiese perché non studiava medicina, diritto o filologia invece che fisica. «Puoi fare quello che vuoi», gli disse Pernet, «volevo solo avvisarti nel tuo interesse».

Einstein non facilitava le cose con il suo atteggiamento disinvolto verso il programma di studio. «Uno doveva imbottirsi la testa con tutta quella roba per gli esami, che gli piacesse o no», disse in seguito. Il suo professore di matematica, Herman Minkowski, il cui nome ricorrerà spesso nel capitolo II, era così sconcertato dall'atteggiamento di Einstein che lo definiva un «cane pigro».

Ma Einstein non era pigro. Era solo selettivo. Assorbiva a fondo alcune parti del programma, altre le ignorava, preferendo dedicare il tempo a studiare e pensare per conto suo. Pensare era divertente, piacevole e soddisfacente; da solo poteva imparare la «nuova» fisica, quella che Heinrich Weber ometteva da ogni sua lezione.

L'etere e lo spazio e il tempo assoluti di Newton

La «vecchia» fisica, quella che Einstein *poteva* imparare da Weber, costituiva un vasto corpus di conoscenze che chiamerò *newtoniano*, non perché fosse interamente dovuto a Isaac Newton (non lo era), ma perché egli ne aveva gettato le basi nel XVII secolo.

Intorno alla fine del XIX secolo tutti i vari fenomeni dell'Universo fisico potevano essere elegantemente spiegati in base a una manciata di semplici *leggi fisiche newtoniane*. Ad esempio, tutti i fenomeni che avevano a che fare con la gravità potevano essere spiegati dalle *leggi di Newton sul moto e sulla gravità*:

- Ogni corpo persevera nello stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, a meno che non sia costretto a cambiare da forze impresse a mutare questo stato.
- Quando una forza agisce su un oggetto, l'accelerazione dell'oggetto è direttamente proporzionale alla forza e inversamente proporzionale alla sua massa.
- Tra due oggetti qualsiasi dell'Universo agisce una forza gravitazionale direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

Elaborando matematicamente[1] queste tre leggi, i fisici del XIX secolo erano in grado di spiegare le orbite dei pianeti attorno al Sole, quelle delle lune attorno ai pianeti, le alte e le basse maree degli oceani, e la caduta delle rocce; e impararono anche a misurare il peso del Sole e della Terra. Analogamente, elaborando un semplice insieme di leggi elettriche e magnetiche, i fisici potevano spiegare i fulmini, i magneti, le onde radio e la propagazione, la diffrazione e la riflessione della luce.

La fama e la fortuna avrebbero arriso a coloro che fossero riusciti ad applicare le leggi newtoniane alla tecnologia. Elaborando le leggi di Newton sul calore, James Watt ha escogitato il modo di convertire il primitivo motore a vapore inventato da altri nel pratico meccanismo che prese il suo nome. Attingendo a piene mani alle conoscenze di Joseph Henry in materia di leggi dell'elettricità e del magnetismo, Samuel Morse inventò la sua redditizia versione del telegrafo.

Fisici e inventori andavano fieri della perfezione delle loro conoscenze. Ogni cosa in cielo e in Terra sembrava obbedire alle leggi newtoniane della

fisica, e il dominio di quelle leggi stava portando gli esseri umani a dominare il loro ambiente, e forse un giorno l'intero Universo.

Einstein poteva apprendere tutte le vecchie, consolidate leggi newtoniane e le loro applicazioni tecnologiche grazie alle lezioni di Weber, e lo fece bene. In effetti, nei primi anni all'EHT, Einstein era entusiasta di Weber. All'unica donna della sua classe (e di cui era innamorato), Mileva Marić, scrisse nel febbraio del 1898 che «Weber insegna in modo magistrale. Pregusto in anticipo ogni sua lezione».

Ma al quarto anno all'EHT Einstein era profondamente insoddisfatto. Weber insegnava solo la *vecchia* fisica. Egli ignorava completamente alcuni dei più importanti sviluppi dei decenni recenti compresa la scoperta da parte di James Clerk Maxwell di un nuovo insieme di eleganti leggi in campo elettromagnetico dalle quali si potevano dedurre tutti i fenomeni elettromagnetici: il comportamento dei magneti, le scintille elettriche, i circuiti elettrici, le onde radio, la luce. Einstein dovette imparare da solo le leggi di Maxwell che unificavano l'elettromagnetismo leggendo libri aggiornati scritti da fisici di altre università, e presumibilmente non esitò a informare Weber della sua scontentezza. I suoi rapporti con Weber si deteriorarono.

A posteriori, è chiaro che di tutte le cose che Weber ignorava nelle sue lezioni, la più importante era la crescente evidenza delle crepe che si aprivano nelle fondamenta della fisica newtoniana, fondamenta il cui cemento e i cui mattoni erano i concetti di Newton di spazio e tempo in quanto assoluti.

Lo *spazio assoluto* di Newton era lo spazio dell'esperienza quotidiana con le sue tre dimensioni: est-ovest, nord-sud, alto-basso. Era ovvio dall'esperienza quotidiana che vi è un solo e unico spazio del genere. È uno spazio condiviso dall'intera umanità, dal Sole, da tutti i pianeti e le stelle. Tutti noi ci muoviamo in questo spazio a modo nostro e alla nostra velocità, e a prescindere dal nostro moto sperimentiamo lo spazio allo stesso modo. Questo spazio ci dà il senso della lunghezza, della larghezza e dell'altezza, e secondo Newton tutti noi, a prescindere dal nostro moto, concorderemo sulla lunghezza, la larghezza e l'altezza di un oggetto se ne effettuiamo misurazioni sufficientemente accurate.

Il *tempo assoluto* di Newton era il tempo dell'esperienza quotidiana, il tempo che scorre inesorabilmente in avanti mentre invecchiamo, il tempo misurato dagli orologi ad alta precisione e dalla rotazione della Terra e dal moto dei pianeti. È un tempo il cui scorrere è sperimentato allo stesso modo da tutta l'umanità, dal Sole, da tutti i pianeti e le stelle. Secondo Newton,

tutti noi, a prescindere dal nostro moto, concorderemo sul periodo di un'orbita planetaria o sulla durata del discorso di un politico se useremo degli orologi abbastanza precisi per misurare quell'orbita o quel discorso.

Se i concetti di Newton di spazio e tempo come assoluti si fossero sgretolati, l'intero edificio delle leggi fisiche newtoniane sarebbe andato in pezzi, Fortunatamente, anno dopo anno, decennio dopo decennio, secolo dopo secolo, i concetti fondamentali di Newton avevano saldamente resistito dando luogo a un successo scientifico dietro l'altro, dal campo dei pianeti a quello dell'elettricità a quello del calore. Non vi era segno di alcuna crepa nelle fondamenta, fino al 1881, quando Albert Michelson cominciò a misurare il tempo della propagazione della luce.

Sembrava ovvio, ed era quanto prescrivevano le leggi newtoniane, che se si misura la velocità della luce (o qualsiasi altra cosa) il risultato dipenda da come ci si muove. Se ci si trova in stato di quiete nello spazio assoluto si dovrebbe osservare la stessa velocità della luce in tutte le direzioni. Al contrario, se ci si muove nello spazio assoluto, ad esempio verso est, si dovrebbe osservare un rallentamento della velocità di propagazione della luce verso est e un'accelerazione verso ovest, allo stesso modo in cui una persona che si trovi su un treno diretto verso est vede muoversi più lentamente gli uccelli che volano verso est e più velocemente quelli che volano verso ovest.

Per quanto riguarda gli uccelli, è l'aria a regolare la velocità del loro volo. Battendo le ali gli uccelli di ogni specie si spostano attraverso l'aria alla stessa velocità massima a prescindere dalla direzione del loro volo. Analogamente, secondo le leggi fisiche newtoniane, era una sostanza chiamata *etere* a regolare la velocità di propagazione della luce. Battendo i suoi campi elettrici e magnetici, la luce si propaga attraverso l'etere sempre alla stessa velocità universale a prescindere dalla direzione di propagazione. E poiché l'etere (secondo le concezioni newtoniane) è in stato di quiete nello spazio assoluto, chiunque si trovi in uno stato inerziale misurerà la stessa velocità della luce in tutte le direzioni, mentre chiunque si trovi in movimento misurerà velocità della luce differenti.

Ora, la Terra si muove nello spazio assoluto, se non altro per via del suo moto attorno al Sole; si muove in una direzione a gennaio, poi in quella opposta sei mesi dopo, a giugno. In maniera corrispondente, sulla Terra dovremmo misurare velocità della luce diverse nelle diverse direzioni, e le differenze dovrebbero cambiare con le stagioni, anche se assai lievemente (circa 1 parte su 10.000), poiché la Terra si muove molto lentamente rispetto alla luce.

Verificare questa previsione costituiva una sfida affascinante per i fisici sperimentali. Albert Michelson, un ventottenne americano, raccolse questa sfida nel 1881 utilizzando una tecnica sperimentale di estrema precisione (oggi chiamata «interferometria di Michelson»[2]) di sua invenzione. Ma per quanto vi provasse, Michelson non riusciva a trovare alcuna prova di una variazione della velocità della luce in base alla direzione. La velocità risultava la stessa in *tutte* le direzioni e in *tutte* le stagioni nei primi esperimenti che effettuò a Potsdam, in Germania, nel 1881, e ancora la stessa negli esperimenti da lui condotti con precisione molto maggiore nel 1887 a Cleveland, in Ohio, insieme al chimico Edward Morley. Michelson reagì con un misto di euforia per questa scoperta e delusione per le sue conseguenze. Heinrich Weber e la maggior parte degli altri fisici dell'ultimo decennio dell'Ottocento, reagirono con scetticismo.

Era facile essere scettici. Gli esperimenti interessanti spesso sono terribilmente difficili, talmente difficili, in effetti, che per quanto vengano effettuati con la massima accuratezza possono spesso dare risultati sbagliati. Basta una piccola anomalia nell'attrezzatura, una lieve fluttuazione incontrollata della sua temperatura o una vibrazione improvvisa del pavimento che la sostiene per alterare il risultato finale dell'esperimento. Perciò non sorprende che i fisici di oggi, come quelli della fine del XIX secolo, si trovino di fronte a esperimenti di enorme difficoltà che contrastano l'uno con l'altro o con le nostre più profonde convinzioni sulla natura dell'Universo e sulle sue leggi fisiche. Esempi recenti sono gli esperimenti volti a scoprire una «quinta forza» (non prevista dalle ampiamente valide leggi fisiche standard) e quelli che ne negano l'esistenza; e anche gli esperimenti volti a dimostrare la possibilità della «fusione fredda» (un fenomeno proibito dalle leggi standard, se i fisici le interpretano correttamente) e altri che la negano. Quasi sempre gli esperimenti che minacciano le nostre convinzioni profonde sono sbagliati; i loro risultati radicali sono il prodotto di un errore sperimentale. Tuttavia, a volte, sono corretti e indicano la via per una rivoluzione nella nostra concezione della natura.

Caratteristica di un buon fisico è quella di possedere il «fiuto» per riconoscere gli esperimenti di cui fidarsi e quelli di cui non fidarsi, quelli su cui riflettere e quelli da ignorare. Con il progredire della tecnologia e la ripetizione degli esperimenti, la verità emerge infine con chiarezza; ma se si cerca di contribuire al progresso della scienza e si vuole dare la propria impronta alle principali scoperte, bisogna indovinare prima, e non dopo, di quali esperimenti fidarsi.

Numerosi eccellenti fisici della fine del XIX secolo esaminarono l'esperi-

mento di Michelson-Morley e giunsero alla conclusione che le caratteristiche intrinseche della strumentazione e l'estrema accuratezza con cui era stato effettuato ne facevano un caso estremamente convincente. Il fiuto diceva loro che l'esperimento era credibile; poteva esserci qualcosa che non andava nelle fondamenta della fisica newtoniana. Al contrario, Heinrich Weber e la maggior parte degli altri confidavano nel fatto che con il tempo e ulteriori sforzi sperimentali sarebbe tornato tutto a posto; alla fine la fisica newtoniana avrebbe trionfato, come tante altre volte in precedenza. Sarebbe stato fuori luogo anche solo citare l'esperimento in questione in una lezione universitaria; non bisognava confondere delle giovani menti.

Il fisico irlandese George F. Fitzgerald fu il primo a prendere sul serio l'esperimento di Michelson-Morley e a riflettere sulle sue implicazioni. Confrontandolo con altri esperimenti, giunse alla conclusione radicale che il difetto risiedeva nella concezione che i fisici avevano della «lunghezza», e di conseguenza potevano sbagliarsi in qualche modo nell'interpretare il concetto di spazio assoluto di Newton. In un breve articolo del 1889 pubblicato sulla rivista americana «Science» egli scrisse:

> Ho letto con grande interesse dell'esperimento estremamente delicato di Michelson e Morley… i loro risultati appaiono in contrasto con quelli di altri esperimenti… suggerirei come unica ipotesi capace di riconciliare questa discrepanza quella per cui la lunghezza dei corpi materiali cambia, a seconda che essi si muovano nell'etere [nello spazio assoluto] o attraverso di esso, di una quantità determinata dal quadrato del rapporto delle loro velocità rispetto a quella della luce.

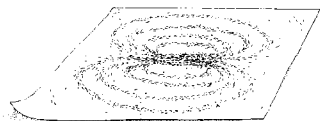
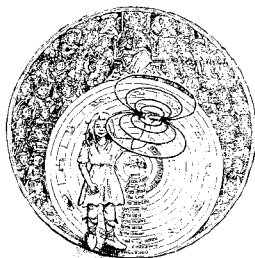
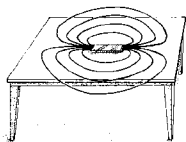
Una lieve (pari a cinque parti su un miliardo) contrazione della lunghezza nella direzione del moto terrestre poteva in effetti spiegare il risultato nullo ottenuto nell'esperimento di Michelson-Morley. Ma ciò significava ripudiare la visione dei fisici sul comportamento della materia: nessuna forza conosciuta poteva far contrarre degli oggetti in movimento lungo la direzione del loro moto, neppure di un'entità così piccola. Se i fisici comprendevano correttamente la natura dello spazio e la natura delle forze molecolari all'interno dei corpi solidi, dei corpi solidi in moto uniforme dovevano conservare sempre la loro forma e le loro dimensioni rispetto allo spazio assoluto, a prescindere dalla velocità del loro movimento.

Anche Hendrik Lorentz ad Amsterdam credeva all'esperimento di Michelson-Morley e prese sul serio l'ipotesi di Fitzgerald che gli oggetti in mo-

vimento si contraessero. Venutone a conoscenza, Fitzgerald scrisse a Lorentz rallegrandosi perché, diceva: «Sono stato perlopiù deriso per questa mia idea». Cercando di arrivare a una maggiore comprensione, Lorentz, e in maniera indipendente Henri Poincaré a Parigi e Joseph Larmor a Cambridge, riesaminarono le leggi dell'elettromagnetismo e notarono una particolarità che combaciava con l'idea di Fitzgerald della contrazione della lunghezza.

Se si esprimevano le leggi elettromagnetiche di Maxwell in termini di campi elettrici e magnetici misurati in stato di quiete nello spazio assoluto, esse assumevano una forma matematica particolarmente semplice ed elegante. Ad esempio, una delle leggi diceva semplicemente: «Viste da un soggetto in stato di quiete, nello spazio assoluto le linee del campo magnetico non hanno capi» (si veda la figura 1.1a, b). Tuttavia, esprimendole nei termini dei campi leggermente diversi misurati da un soggetto in movimento, le leggi di Maxwell apparivano molto più brutte e complicate. In particolare, la legge dell'«assenza di capi» diveniva: «Viste da un soggetto in movimento, la maggior parte delle linee del campo magnetico sono infinite, ma alcune vengono spezzate dal movimento e presentano pertanto dei capi. Inoltre, quando il soggetto in movimento scuote il magnete altre linee del campo si spezzano, poi si ricongiungono, si spezzano di nuovo, poi si ricongiungono ancora» (si veda la figura 1.1c).

La nuova scoperta matematica di Lorentz, Poincaré e Larmor era un modo per conferire alle leggi elettromagnetiche del soggetto in movimento una forma elegante, e infatti esse apparivano identiche alle leggi che si applicavano a un soggetto in stato di quiete nello spazio assoluto: «In qualsiasi circostanza, le linee di un campo magnetico non hanno fine». Si poteva far assumere alle leggi questa elegante formulazione ipotizzando, in contrasto con i precetti newtoniani, che tutti gli oggetti in movimento si contraggono nel verso della direzione del loro moto esattamente nella misura necessaria a Fitzgerald per spiegare l'esperimento di Michelson-Morley!

Se la contrazione di Fitzgerald fosse stata l'unico elemento di «nuova fisica» necessario per rendere le leggi elettromagnetiche universalmente semplici ed eleganti, Lorentz, Poincaré e Larmor, con la loro intuitiva fiducia nel fatto che le leggi fisiche *dovevano* essere eleganti, avrebbero potuto mettere da parte i precetti newtoniani e credere fermamente nella contrazione di Fitzgerald. Tuttavia essa non era sufficiente di per sé. Per rendere le leggi eleganti, si doveva anche ipotizzare che il tempo scorresse più lentamente quando è misurato da un soggetto che si muove nell'Universo rispetto a uno in stato inerziale; il moto «dilata» il tempo.

1.1 – Una delle leggi elettromagnetiche di Maxwell nell'interpretazione dei fisici newtoniani del XIX secolo: (a) Il concetto di linea di un campo magnetico: se si posiziona una barra magnetica sotto un foglio di carta e si sparge della limatura di ferro sul foglio, essa disegna le linee di campo del magnete. Ogni linea esce dal polo nord del magnete, gira attorno a esso e vi rientra dal polo sud, poi viaggia attraverso il magnete fino al polo nord dove si ricollega a se stessa. La linea di campo è pertanto una curva chiusa, simile in qualche modo a una camera d'aria, priva di capi. L'affermazione secondo cui «le linee del campo magnetico non hanno mai fine» è la legge di Maxwell nella sua forma più semplice ed elegante; (b) secondo la fisica newtoniana, questa versione della legge di Maxwell è corretta a prescindere da cosa si faccia con il magnete (ad esempio, anche se lo si scuote violentemente) *purché ci si trovi in stato di quiete nello spazio assoluto*. Nessuna linea di campo ha *mai* fine, dal punto di vista di un soggetto in stato di quiete; (c) analizzata da un soggetto che si sposta sulla superficie della Terra mentre questa si muove nello spazio assoluto, la legge di Maxwell è molto più complicata, secondo la fisica newtoniana. Se il magnete del soggetto in movimento è tranquillamente poggiato su un tavolo, alcune delle sue linee di campo (circa una su cento milioni) presenterà dei capi. Se il soggetto lo scuote violentemente, ulteriori linee di campo (una su mille miliardi) verranno temporaneamente spezzate e poi si ricongiungeranno, poi si spezzeranno di nuovo e torneranno a ricongiungersi. Malgrado una linea di campo su cento milioni o su mille miliardi dotata di capi fosse una quantità troppo esigua per essere osservata in un esperimento di fisica del XIX secolo, il fatto che le leggi di Maxwell prevedessero un simile evento sembrava piuttosto complicato e inelegante a Lorentz, Poincaré e Larmor.

Ora, le leggi newtoniane della fisica erano inequivocabili: il tempo è *assoluto*. Esso scorre uniformemente e inesorabilmente alla stessa velocità universale indipendentemente da come ci si muova. Se le leggi newtoniane erano corrette, il moto non poteva causare una dilatazione del tempo più di quanto non provocasse una contrazione della lunghezza. Purtroppo gli orologi della fine del XIX secolo erano troppo poco precisi per rivelare la verità, e di fronte ai successi scientifici e tecnologici della fisica newtoniana, successi che poggiavano saldamente sulle fondamenta del concetto assoluto di tempo, nessuno era disposto ad affermare con convinzione che il tempo si dilati davvero. Lorentz, Poincaré e Larmor parlavano a vanvera.

Einstein, quando era ancora uno studente a Zurigo, non era pronto ad affrontare argomenti di tale portata, ma cominciava già a riflettervi sopra. Alla sua amica Mileva Marić (con cui stava sbocciando una storia d'amore) egli scriveva nell'agosto del 1899: «Sono sempre più convinto che l'elettrodinamica dei corpi in movimento, così come viene presentata attualmente, non sia corretta». Nei sei anni successivi, mentre le sue capacità come fisico andavano maturando, avrebbe riflettuto sulla questione e sulla realtà della contrazione della lunghezza e della dilatazione del tempo.

Weber, invece, non mostrava alcun interesse per queste speculazioni. Continuava a insegnare la fisica newtoniana come se tutto fosse perfettamente in ordine e non vi fossero indizi di crepe nelle sue fondamenta.

Avvicinandosi alla fine dei suoi studi all'ETH, Einstein riteneva ingenuamente che, poiché era intelligente e non se l'era poi cavata male negli studi (un punteggio complessivo di 4,91 su 6,00), gli sarebbe stato offerto un incarico di assistente di fisica all'ETH sotto la direzione di Weber, e che avrebbe potuto usarlo, com'era abituale, da trampolino di lancio per entrare nel mondo accademico. In qualità di assistente avrebbe potuto iniziare a fare ricerca per conto suo e arrivare in pochi anni a ottenere un dottorato.

Ma le cose non erano destinate ad andare così. Dei quattro studenti che superarono gli esami finali nel corso combinato di matematica e fisica nell'agosto del 1900, tre divennero assistenti all'ETH sotto la direzione di alcuni matematici; il quarto, Einstein, non ottenne niente. Weber prese come assistenti due studenti di ingegneria piuttosto che Einstein.

Questi, insisté nei suoi tentativi. A settembre, un mese dopo la laurea, presentò la sua candidatura per un posto vacante di assistente in matematica all'ETH. Venne respinta. In inverno e in primavera fece analoga richiesta a Wilhelm Ostwald a Lipsia e a Heike Kamerlingh Onnes a Leida. Da loro sembra

non aver mai ricevuto nemmeno la cortesia di una risposta, malgrado la sua richiesta a Onnes oggi sia orgogliosamente esposta in un museo di Leida, e malgrado dieci anni dopo Ostwald sia stato il primo a candidare Einstein al premio Nobel. Perfino la lettera a Ostwald del padre di Einstein sembra non aver suscitato alcuna risposta. Alla sfacciata e determinata Mileva Marić, con cui la storia si era fatta intensa, Einstein scrisse il 27 marzo 1901: «Sono assolutamente convinto che la colpa sia di Weber… non ha senso scrivere a nessun altro professore, perché prima o poi si rivolgeranno sicuramente a Weber per avere informazioni su di me e lui non farà che esprimere un'altra volta un giudizio negativo». A un caro amico, Marcel Grossman, egli scrisse il 14 aprile 1901: «Avrei potuto ottenere [un incarico come assistente] da un pezzo, se non fosse stato per gli intrighi di Weber. Tuttavia, non me ne sto con le mani in mano e non perdo il senso dell'umorismo… Dio ha fatto l'asino e gli ha dato una pelle dura».

E una pelle dura era ciò di cui aveva bisogno; non solo cercava invano un lavoro, ma i suoi genitori si opponevano con tutte le loro forze ai suoi progetti di matrimonio con Mileva, e la sua relazione con quest'ultima si faceva turbolenta. Sua madre scrisse a proposito di Mileva: «Questa signorina Marić mi sta facendo passare le ore più amare della mia vita; se ne avessi il potere, farei qualunque cosa per farla sparire dal nostro orizzonte. Non mi piace proprio per niente». E sulla madre di Einstein Mileva scriveva: «Quella donna sembra essersi ripromessa nella vita di amareggiare il più possibile non solo la mia esistenza, ma anche quella di suo figlio… Non avrei mai pensato potessero esistere persone senza cuore e malvagie come questa!».

Einstein voleva disperatamente liberarsi dalla dipendenza economica dai suoi genitori e avere la serenità e la libertà di dedicare la maggior parte delle sue energie alla fisica. Forse era possibile ottenere ciò per vie diverse da un incarico di assistente all'università. Il diploma ottenuto all'ETH gli permetteva di insegnare in un *gymnasium*, e questo fece: a metà maggio del 1901 riuscì a ottenere un lavoro temporaneo in un liceo tecnico a Winterthur, in Svizzera, sostituendo un professore di matematica che doveva fare il servizio militare.

Al suo ex-professore di storia dell'ETH, Alfred Stern, egli scrisse: «Sono fuori di me dalla contentezza per [questo lavoro come insegnante], perché oggi ho avuto la notizia che tutto è definitivamente sistemato. Non ho la più pallida idea di chi possa essere stato il benefattore che mi ha raccomandato lì, perché, per quanto ne so, non godo dei favori di nessuno dei miei ex-insegnanti». Il lavoro a Winterthur, seguito nell'autunno del 1901 da un'altra

supplenza a Schaffausen, sempre in Svizzera, e nel giugno del 1902 da un lavoro in qualità di «esperto tecnico di terza classe» presso l'Ufficio brevetti di Berna, gli valsero l'indipendenza e la stabilità.

Malgrado la prolungata turbolenza della sua vita sentimentale (lunghe separazioni da Mileva; un figlio illegittimo avuto dalla stessa Mileva nel 1902 che sembra sia stato dato in adozione, forse per proteggere la carriera di Einstein nella seriosa Svizzera; il matrimonio con Mileva un anno dopo malgrado la violenta opposizione dei suoi genitori), Einstein era ottimista e abbastanza sereno per riflettere, e immergersi profondamente nella fisica: dal 1901 al 1904 egli affinò le sue capacità di fisico dedicandosi alla ricerca teorica sulla natura delle forze che agiscono tra le molecole nei liquidi, come l'acqua, e nei metalli, e alla ricerca sulla natura del calore. Le sue nuove, rilevanti, scoperte vennero pubblicate in una serie di cinque articoli sulla più prestigiosa rivista di fisica dei primi del Novecento, gli «Annalen der Physik».

L'Ufficio brevetti di Berna era propizio all'affinamento delle capacità di Einstein. Sul lavoro era chiamato a stabilire se le invenzioni presentate potevano funzionare, un compito spesso piacevole e che rendeva più penetrante la sua mente. Inoltre, gli lasciava libera metà giornata e tutto il fine settimana, tempo che passava per la maggior parte studiando e riflettendo sulla fisica, spesso nel bel mezzo del caos familiare.

La sua capacità di concentrarsi malgrado le distrazioni è stata descritta da uno studente che gli ha fatto visita a casa diversi anni dopo il matrimonio con Mileva: «Stava seduto nel suo studio davanti a un mucchio di fogli ricoperti di formule matematiche. Scriveva con la destra e sosteneva il figlio più piccolo con la sinistra mentre continuava a rispondere alle domande del figlio più grande impegnato a giocare con le costruzioni. Dicendomi: "Aspetta un istante, ho quasi finito", mi affidò i figli per qualche attimo e continuò a lavorare».

A Berna Einstein era isolato dagli altri fisici (anche se aveva alcuni buoni amici, che non erano fisici, ma con i quali poteva discutere di scienza e di filosofia). Per la maggior parte dei fisici un simile isolamento sarebbe disastroso: hanno bisogno del contatto con altri colleghi che lavorano su problemi analoghi per evitare che le loro ricerche imbocchino direzioni improduttive. Ma l'intelletto di Einstein era diverso, egli lavorava più fruttuosamente nell'isolamento che in un ambiente stimolante a contatto con altri fisici.

A volte parlare con qualcuno lo aiutava, non perché gli fornisse nuove profonde intuizioni o informazioni, ma soprattutto perché spiegandoli ad

A sinistra: Einstein seduto alla scrivania nell'Ufficio brevetti di Berna, ca 1905. *A destra*: Einstein con la moglie Mileva e il figlio Hans Albert, ca 1904. [A sinistra: per gentile concessione degli Albert Einstein Archives dell'Università Ebraica di Gerusalemme; a destra: per gentile concessione dello Schweizerisches Literaturachiv/Archiv der Einstein-Gesellschaft, Berna].

altri riusciva a chiarire meglio a se stesso problemi e paradossi. Di particolare aiuto gli era Michele Angelo Besso, un ingegnere italiano che era stato compagno di classe di Einstein all'ETH e ora lavorava accanto a lui all'Ufficio brevetti. Di Besso Einstein diceva: «Non avrei potuto trovare una cassa di risonanza migliore in tutta Europa».

Lo spazio e il tempo relativi e la velocità della luce assoluta di Einstein

Michele Angelo Besso fu di particolare utilità nel maggio del 1905, quando Einstein, dopo essersi concentrato per diversi anni su altri aspetti della fisica, tornò a dedicarsi alle leggi dell'elettrodinamica di Maxwell e ai loro stimolanti indizi sulla contrazione della lunghezza e la dilatazione del tempo. Il tentativo da parte di Einstein di dare una spiegazione a tali indizi era vanificato da un blocco mentale. Per liberarsene chiese aiuto a Besso. Come egli

ha ricordato in seguito: «Fu davvero un bel giorno quello in cui andai a trovare [Besso] e cominciai a parlare con lui in questi termini: "Di recente mi sono imbattuto in una questione che trovo difficile da comprendere. Così oggi sono venuto a ingaggiare una battaglia su questo aspetto". Sostenendo molte discussioni con lui arrivai improvvisamente ad afferrare la questione. Il giorno dopo andai a trovarlo di nuovo e gli dissi senza nemmeno salutarlo "Grazie. Ho risolto completamente il problema"».

Ecco la soluzione di Einstein: *Non esiste lo spazio assoluto. Non esiste il tempo assoluto. I fondamenti di tutta la fisica newtoniana presentano dei difetti. E quanto all'etere, esso non esiste.*

Confutando lo spazio assoluto, Einstein ha reso assolutamente privo di significato il concetto di «stato di quiete nello spazio assoluto». Non c'è modo, egli affermava, di misurare il moto della Terra nello spazio assoluto ed è per questo che l'esperimento di Michelson-Morley dava i risultati che dava. Si può misurare la velocità della Terra solo *relativamente ad altri oggetti fisici* come il Sole o la Luna, così come si può misurare la velocità di un treno solo relativamente a oggetti fisici come il terreno e l'aria. Né per la Terra, né per il treno, né per qualsiasi altra cosa esiste alcuno standard di moto assoluto; il moto è puramente «relativo».

Confutando lo spazio assoluto, Einstein negava anche l'idea secondo cui tutti, a prescindere dal loro moto, debbano concordare sulla lunghezza, l'altezza e la larghezza di un tavolo, di un treno o di qualsiasi altro oggetto. Invece, affermava Einstein, *lunghezza, altezza e larghezza sono concetti «relativi»*. Esse dipendono dal moto relativo dell'oggetto che viene misurato e del soggetto che effettua la misurazione.

Confutando il tempo assoluto, Einstein respingeva anche il concetto secondo cui tutti, a prescindere dal loro moto, devono sperimentare il flusso del tempo allo stesso modo. *Il tempo è relativo*, affermava Einstein. Ogni persona che viaggia a modo suo deve sperimentare un flusso temporale diverso dagli altri, poiché viaggia in modo diverso.

È difficile non sentirsi a disagio di fronte ad affermazioni come queste. Se sono corrette, non solo distruggono le fondamenta su cui poggia l'intero edificio delle leggi fisiche newtoniane, ma ci privano anche dei nostri concetti comuni, quotidiani, di spazio e tempo.

Ma Einstein non era solo un distruttore. Era anche un creatore. Egli ci ha fornito delle nuove fondamenta per sostituire quelle vecchie, delle fondamenta altrettanto solide e, come si è potuto constatare, in perfetto accordo con l'Universo.

Le nuove fondamenta di Einstein consistevano nei due seguenti princìpi fondamentali:

• *Il principio dell'assolutezza della velocità della luce*: qualunque sia la loro natura, lo spazio e il tempo devono essere fatti in modo tale che la velocità della luce sia assolutamente la stessa in ogni direzione e assolutamente indipendente dal moto di chi la misura.

Questo principio costituisce un'evidente affermazione della correttezza dell'esperimento di Michelson-Morley, e del fatto che a prescindere da quanto possano diventare precisi in futuro, gli strumenti per misurare la luce devono continuare a dare sempre lo stesso risultato: una velocità della luce universale.

• *Il principio della relatività*: qualunque sia la loro natura, le leggi della fisica devono trattare tutti gli stati di moto su un piano di parità.

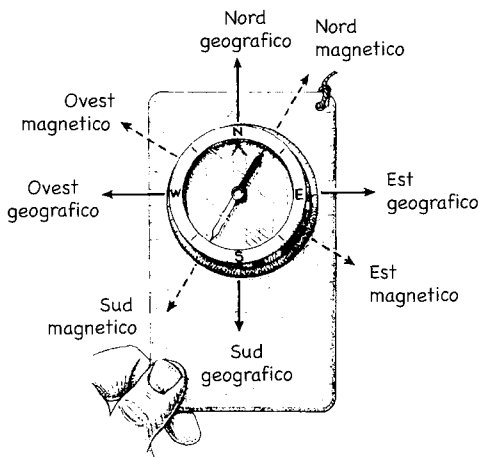
Questo principio costituisce un'evidente negazione dello spazio assoluto: se le leggi della fisica non trattano tutti gli stati di moto (ad esempio quello del Sole e quello della Terra) su un piano di parità, al momento di applicarle i fisici potrebbero scegliere uno stato di moto «preferito» (ad esempio quello del Sole) e definirlo come lo stato di «quiete assoluta». Lo spazio assoluto finirebbe in tal modo per rientrare nella fisica. Torneremo su questo punto più avanti nel presente capitolo.

Dall'assolutezza della velocità della luce Einstein dedusse, mediante un elegante argomento logico descritto nella scheda 1.1 qui di seguito, che se io e voi ci muoviamo relativamente gli uni agli altri, *ciò che chiamo spazio deve essere un misto del vostro spazio e del vostro tempo, e ciò che voi chiamate spazio deve essere un misto del mio spazio e del mio tempo.*

Questo «misto di spazio e tempo» è analogo al mescolarsi delle direzioni sulla Terra. La natura ci offre due modi di stabilire le direzioni, uno legato alla rotazione della Terra, l'altro al suo campo magnetico. A Pasadena, in California, il nord magnetico (la direzione indicata dall'ago di una bussola) è inclinato a est rispetto al nord geografico (la direzione dell'asse di rotazione terrestre, il «Polo Nord») di circa 20 gradi (figura 1.2). Ciò significa che per viaggiare in direzione del nord magnetico si deve procedere in parte (circa l'80%) verso il nord geografico e in parte (circa il 20%) verso l'est geografico. In questo senso, *il nord magnetico è un misto di nord geografico e di est geografico*; analogamente, il nord geografico è un misto di nord magnetico e di ovest magnetico.

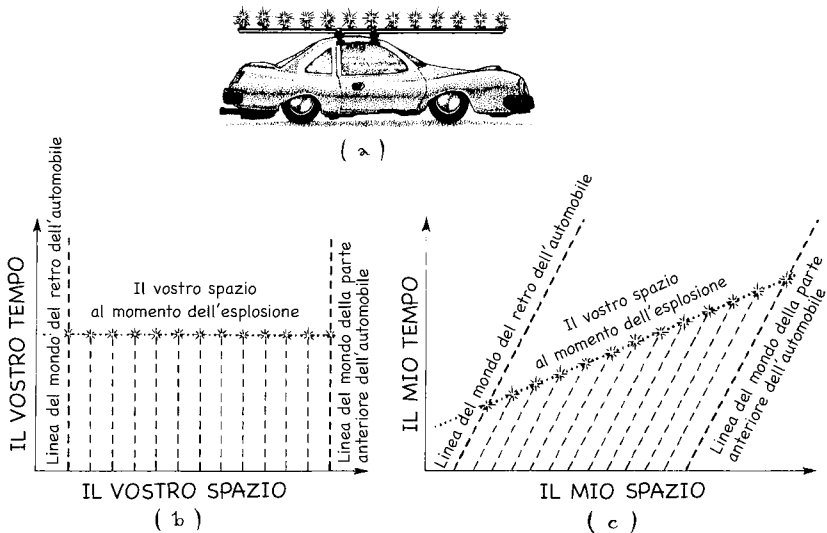
Per comprendere l'analogo misto di spazio e tempo (*il vostro spazio è un misto del mio spazio e del mio tempo, e il mio spazio è un misto del vostro spazio e del vostro tempo*), immaginate di possedere una potente macchina sportiva. Vi piace guidarla per il Colorado Boulevard di Pasadena a una velocità estremamente elevata nel cuore della notte mentre io, un poliziotto, sto sonnecchiando. Sul tettuccio dell'automobile fissate una serie di petardi, uno davanti al cofano, uno dietro sopra il portabagagli e molti altri in mezzo (si veda la figura 1.3a). Sistemate i petardi in modo che esplodano simultaneamente dal vostro punto di vista proprio mentre passate davanti alla mia stazione di polizia.

La figura 1.3b lo illustra dal vostro punto di vista. Verticalmente è tracciato il flusso del tempo così come lo misurate voi (il «vostro tempo»). Poiché i petardi sono tutti in stato di quiete nel vostro spazio (ossia, così come li vedete voi), al trascorrere del vostro tempo restano tutti nella stessa posizione orizzontale indicata nel diagramma. Le linee tratteggiate, una per ogni petardo, descrivono questa situazione. Esse sono tracciate verticalmente verso l'alto e indicano l'assenza di qualsiasi movimento verso destra o sinistra nello spazio durante il trascorrere del tempo, e si interrompono improvvisamente nel momento in cui scoppiano i petardi. Le singole detonazioni sono indicate da asterischi.

La figura viene chiamata *diagramma spaziotemporale* perché raffigura lo spazio orizzontalmente e il tempo verticalmente; le linee tratteggiate vengono chiamate *linee del mondo* perché mostrano dove vengono a trovarsi nel mondo i petardi mentre trascorre il tempo. Nel prosieguo del libro si farà ampio ricorso ai diagrammi spaziotemporali e alle linee del mondo.

1.2 – Il nord magnetico è un misto di nord geografico ed est geografico, e il nord geografico è un misto di nord magnetico e ovest magnetico.

Se ci si sposta orizzontalmente nel diagramma (figura 1.3b), ci si muove nello spazio in un momento determinato del vostro tempo. Pertanto, è opportuno pensare che ogni linea orizzontale del diagramma raffiguri lo spazio così come lo vedete voi (il «vostro spazio») in un momento specifico del vostro tempo. Ad esempio, la linea orizzontale punteggiata è il vostro spazio al momento della detonazione dei petardi. Se ci si sposta verticalmente verso l'alto nel diagramma, ci si muove nel tempo in un punto determinato del vostro spazio. Pertanto, è opportuno pensare che ogni linea verticale nel diagramma spaziotemporale (ad esempio la linea del mondo di ogni singolo petardo) raffiguri lo scorrere del vostro tempo in una ubicazione specifica nel vostro spazio.

Io, nella stazione di polizia, se non stessi sonnecchiando, disegnerei un diagramma spaziotemporale abbastanza diverso per raffigurare la vostra au-

1.3 – (a) La vostra automobile sportiva mentre percorre il Colorado Boulevard con i petardi fissati sul tettuccio. (b) Diagramma spaziotemporale che raffigura il movimento e l'esplosione dei petardi dal vostro punto di vista (alla guida dell'automobile). (c) Diagramma spaziotemporale che raffigura lo stesso movimento e la stessa esplosione dei petardi dal mio punto di vista (in stato di quiete nella stazione di polizia).

tomobile, i vostri petardi e l'esplosione (figura 1.3c). Traccerei lo scorrere del tempo, misurato da me, verticalmente e la distanza lungo il Colorado Boulevard orizzontalmente. Col passare del tempo ogni petardo avanza ad alta velocità assieme alla vostra automobile lungo il Colorado Boulevard, e di conseguenza la linea del mondo di ognuno di essi si inclina verso destra nel diagramma: al momento della sua detonazione il petardo si trova più a destra lungo il Colorado Boulevard rispetto ai momenti precedenti.

Ora, la sorprendente conclusione dell'argomento logico di Einstein (scheda 1.1) è che l'assolutezza della velocità della luce prevede che i petardi non esplodano simultaneamente dal mio punto di vista, anche se esplodono simultaneamente dal vostro. Dal mio punto di vista, il petardo collocato più posteriormente sulla vostra automobile esplode per primo e quello collocato più anteriormente per ultimo. Pertanto la linea punteggiata che abbiamo chiamato «il vostro spazio al momento dell'esplosione» (figura 1.3b), nel mio diagramma spaziotemporale è inclinata (figura 1.3c).

Dalla figura 1.3c risulta chiaro che per muovermi nel vostro spazio nel vostro momento dell'esplosione (lungo la linea punteggiata) devo muovermi sia nel mio spazio che nel mio tempo. In questo senso, il vostro spazio è un misto del mio spazio e del mio tempo. La situazione è esattamente analoga a quella in cui si può affermare che il nord magnetico è un misto di nord geografico e di est geografico (si confronti la figura 1.3c con la figura 1.2).

Si potrebbe essere tentati di affermare che questo «misto di spazio e tempo» non sia altro che un modo complicato ed egoistico di dire che «la simultaneità dipende dallo stato di moto del soggetto». È vero. Tuttavia, i fisici, basandosi sui fondamenti di Einstein, hanno potuto constatare la forza di questo modo di pensare. Esso li ha aiutati a decifrare l'eredità di Einstein (le sue nuove leggi della fisica), e a scoprirvi una serie di fenomeni apparentemente bizzarri: buchi neri, cunicoli temporali, singolarità, deformazioni temporali e macchine del tempo.

Dall'assolutezza della velocità della luce e dal principio di relatività, Einstein ha dedotto altre notevoli caratteristiche dello spazio e del tempo. Nel linguaggio della storia precedente:

• Einstein dedusse che mentre voi procedete lungo il Colorado Boulevard in direzione est, io devo vedere il vostro spazio e qualsiasi cosa vi si trovi in stato di quiete (la vostra auto, i vostri petardi e voi) contrarsi lungo la direzione est-ovest, ma non lungo quella nord-sud o alto-basso. Questa era la contrazione ipotizzata da Fitzgerald, ora dotata di un solido fondamento: la

contrazione è provocata dalla particolare natura dello spazio e del tempo, e non da una forza fisica che agisca sulla materia in movimento;

- Analogamente, Einstein dedusse che, mentre procedete verso est, dovete vedere il mio spazio e qualsiasi cosa vi si trovi in stato di quiete (la mia stazione di polizia, la mia scrivania e me) contrarsi lungo la direzione est-ovest, ma non lungo quella nord-sud o alto-basso. Che mi vediate contratto e che io vi veda contratti può sembrare sconcertante, ma in effetti non potrebbe essere altrimenti: ciò mette il mio stato di moto e il vostro su un piano di parità, in accordo con il principio della relatività.
- Einstein dedusse inoltre che, mentre mi passate accanto, io vedo il vostro flusso del tempo rallentato, ossia dilatato. L'orologio sul cruscotto della vostra auto sembra ticchettare più lentamente del mio appeso alla parete nella stazione di polizia. Parlate più lentamente, i capelli vi crescono più lentamente, invecchiate più lentamente di me.
- Analogamente, in accordo con il principio della relatività, mentre mi passate accanto, vedete il mio flusso del tempo rallentato. Vedete l'orologio sulla parete della mia stazione ticchettare più lentamente di quello sul vostro cruscotto. Vi sembra che parli più lentamente, i miei capelli crescono più lentamente e invecchio più lentamente di voi.

Come è possibile che io veda rallentare il flusso del vostro tempo e voi il mio? Come è possibile logicamente una cosa simile? E come posso vedere contrarsi il vostro spazio mentre voi vedete contrarsi il mio? La risposta sta nella relatività della simultaneità. Voi e io siamo in disaccordo sul fatto che degli eventi che si producono in luoghi diversi nei nostri rispettivi spazi siano simultanei, e questo disaccordo si incastra con quelli sul flusso del tempo e la contrazione dello spazio esattamente in modo da rendere ogni cosa coerente sul piano logico. Dimostrare questa coerenza, tuttavia, richiederebbe più pagine di quelle che vorrei dedicare al tema, e pertanto vi rimando per una prova al capitolo III dell'opera di Taylor e Wheeler (1992).

Come mai noi esseri umani non ci siamo mai accorti di questo bizzarro comportamento dello spazio e del tempo nella nostra vita quotidiana? La risposta sta nella nostra lentezza. Noi ci muoviamo sempre relativamente gli uni agli altri a velocità molto più piccole di quelle della luce (299.792 chilometri al secondo). Se la vostra auto sfreccia per il Colorado Boulevard a 150 chilometri l'ora, io dovrei vedere il vostro flusso del tempo dilatarsi e il vostro spazio contrarsi in misura pari più o meno a una parte su centomila miliardi ($1x10^{-14}$), un'entità di gran lunga troppo piccola perché possiamo notarla. Al

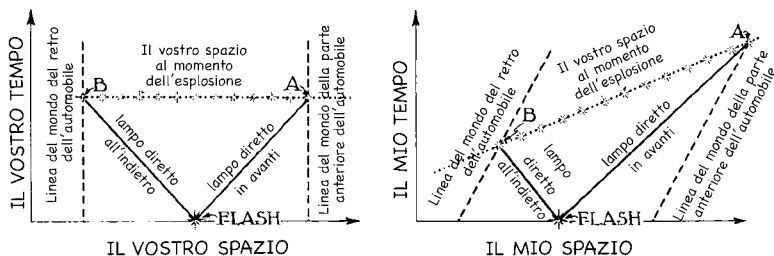
contrario, se la vostra auto mi passasse accanto a una velocità pari all'87% di quella della luce (con degli strumenti dalla risposta molto rapida), dovrei vedere il vostro tempo scorrere due volte più lentamente del mio, mentre voi vedreste il mio scorrere due volte più lentamente del vostro; analogamente io dovrei vedere qualsiasi cosa si trovi nella vostra automobile accorciarsi della metà lungo l'asse est-ovest rispetto alla lunghezza normale e voi dovreste vedere qualsiasi cosa si trovi nella mia stazione di polizia accorciarsi della metà lungo l'asse est-ovest rispetto alla lunghezza normale. In effetti, un'ampia gamma di esperimenti effettuati verso la fine del XX secolo hanno verificato che lo spazio e il tempo si comportano esattamente in questo modo.

Scheda 1.1
LA PROVA DATA DA EINSTEIN DEL MESCOLARSI DELLO SPAZIO E DEL TEMPO

Il principio di Einstein dell'assolutezza della velocità della luce comporta la mescolanza di spazio e tempo; in altre parole, comporta la relatività della simultaneità: eventi che sono simultanei dal vostro punto di vista (che si verificano nel vostro spazio in un momento specifico del vostro tempo), mentre la vostra automobile sportiva percorre il Colorado Boulevard, non sono simultanei per me che mi trovo nella stazione di polizia. Ne darò dimostrazione usando le descrizioni che accompagnano i diagrammi spaziotemporali riportati qui di seguito. Questa dimostrazione è essenzialmente la stessa escogitata da Einstein nel 1905.

Collocate un flash al centro della vostra automobile. Accendetelo. Esso invia un lampo di luce in avanti verso la parte anteriore dell'auto, e un lampo indietro verso la parte posteriore. Dato che i due lampi sono emessi simultaneamente, e dato che percorrono la stessa distanza così come misurata da voi che vi trovate nell'automobile e dato che essi viaggiano alla stessa velocità (la velocità della luce è assoluta), essi devono arrivare alla parte anteriore e a quella posteriore del veicolo simultaneamente dal vostro punto di vista; si veda qui di seguito il diagramma sulla sinistra. I due eventi dell'arrivo del lampo (chiamiamo *A* quello diretto verso la parte anteriore e *B* quello diretto verso la parte posteriore) sono pertanto simultanei dal vostro punto di vista, e coincidono con l'esplosione dei petardi della figura 1.3 così come la vedete voi.

Poi, esaminiamo i lampi di luce e i rispettivi eventi di arrivo *A* e *B* dal mio punto di vista mentre la vostra automobile mi passa accanto; si veda qui di seguito il diagramma sulla destra. Dal mio punto di vista, il retro della vostra auto si sta muovendo in avanti, verso il lampo diretto all'indietro, e quindi

nella mia visione essi si incontrano (evento *B*) prima rispetto alla vostra. Analogamente, la parte anteriore della vostra auto si sta muovendo in avanti, allontanandosi dal lampo diretto in avanti, e quindi essi nella mia visione si incontrano (evento *A*) più tardi rispetto alla vostra (queste conclusioni si basano in modo essenziale sul fatto che le velocità dei due lampi sono identiche, dal mio punto di vista, ossia si basano sull'assolutezza della velocità della luce). Pertanto, io vedo accadere l'evento *B* prima dell'evento *A*; e analogamente vedo i petardi vicini al retro della vostra auto esplodere prima di quelli vicini alla parte anteriore.

Si noti che le ubicazioni delle esplosioni (il vostro spazio in un momento specifico del vostro tempo) sono le stesse nei diagrammi che precedono e nella figura 1.3. Ciò giustifica l'affermazione della mescolanza di spazio e tempo di cui si parla nel testo.

In che modo Einstein è arrivato a formulare questa descrizione radicale dello spazio e del tempo?

Non esaminando i risultati degli esperimenti. Gli orologi della sua epoca erano troppo imprecisi per mostrare, alle basse velocità che potevano raggiungere, qualsiasi dilatazione del tempo o discrepanza in merito alla simultaneità, e le unità di misura erano troppo rozze per registrare una contrazione della lunghezza. Gli unici esperimenti rilevanti erano i pochi, come quello di Michelson e Morley, che ipotizzavano che la velocità della luce sulla superficie della Terra potesse essere la stessa in tutte le direzioni. Erano dati ben scarsi su cui fondare una revisione tanto radicale dei nostri concetti di spazio e di tempo! Inoltre, Einstein prestava poca attenzione a questi esperimenti.

Egli si affidava invece alla sua innata intuizione riguardo al modo in cui le

cose *avrebbero dovuto* comportarsi. Dopo un'intensa riflessione, gli apparve *intuitivamente ovvio* che la velocità della luce dovesse essere una costante universale indipendente dalla direzione e dal movimento del soggetto. Solo in quel caso, secondo il suo ragionamento, le leggi elettromagnetiche di Maxwell potevano essere rese uniformemente semplici ed eleganti (ad esempio, «le linee di un campo magnetico non hanno mai fine»); egli era inoltre fermamente convinto che l'Universo in qualche oscuro modo fosse retto da leggi semplici e armoniose. Egli introdusse pertanto, come nuovo principio su cui fondare tutta la fisica, il principio dell'assolutezza della velocità della luce.

Tale principio bastava già da solo, senza altre aggiunte, a garantire che l'edificio delle leggi fisiche costruito da Einstein sarebbe stato profondamente diverso da quello di Newton. *Un fisico newtoniano, per il fatto di ritenere lo spazio e il tempo assoluti, è costretto a concludere che la velocità della luce è relativa, che dipende dallo stato di moto del soggetto (come mostrato in precedenza in questo capitolo dall'analogia dell'uccello e del treno). Einstein, ipotizzando che la velocità della luce sia assoluta, era obbligato a concludere che lo spazio e il tempo erano relativi, che dipendono dallo stato di moto del soggetto. Una volta dedotto che spazio e tempo sono relativi, Einstein venne spinto dalla sua ricerca della semplicità e della bellezza a formulare il principio della relatività: a nessuno stato di moto deve essere accordata preferenza rispetto a un altro, tutti gli stati di moto devono essere uguali agli occhi della legge fisica.*

Non erano solo gli esperimenti a essere superflui ai fini della costruzione da parte di Einstein dei nuovi fondamenti della fisica; lo erano anche i pareri degli altri fisici. Prestò poca attenzione ai lavori altrui. Sembra non abbia letto nemmeno uno degli importanti articoli tecnici sullo spazio, il tempo e l'etere scritti tra il 1896 e il 1905 da Hendrik Lorentz, Henri Poincaré e Joseph Larmor.

Nei loro articoli, Lorentz, Poincaré e Larmor procedevano alla cieca verso la revisione dei concetti di spazio e tempo al pari di Einstein, ma annaspavano in una nebbia di concezioni erronee trasmesse loro dai fisici newtoniani. Einstein, invece, è stato capace di mettere da parte gli errori newtoniani. La sua convinzione della predilezione dell'Universo per la semplicità e la bellezza, e la sua volontà di farsi guidare da tale convinzione, anche se ciò significava distruggere le fondamenta della fisica newtoniana, lo portarono a dare, con una chiarezza di pensiero che altri non erano in grado di eguagliare, una nuova formulazione dello spazio e del tempo.

Il principio della relatività svolgerà un ruolo importante nel prosieguo di questo libro, perciò dedicherò alcune pagine a darne una spiegazione più approfondita.

Una spiegazione più approfondita richiede il concetto di *quadro di riferimento*. Un quadro di riferimento è un laboratorio che contiene tutti gli strumenti di misurazione necessari per tutte le misurazioni che si desiderino effettuare. Il laboratorio e tutte le sue attrezzature devono muoversi insieme nell'Universo, devono subire tutti lo stesso moto. In effetti, la questione centrale è costituita proprio dal moto del quadro di riferimento. Quando un fisico parla di «quadri di riferimento diversi» l'accento cade sui diversi stati di moto e non sui diversi strumenti di misurazione dei due laboratori.

Il laboratorio assunto come quadro di riferimento e i suoi strumenti non devono necessariamente essere reali. Essi possono essere benissimo prodotti dell'immaginazione ed esistere solo nella mente dei fisici che vogliono porsi domande del tipo: «Se mi trovassi in una nave spaziale che naviga attraverso la cintura degli asteroidi e volessi misurare le dimensioni di uno specifico asteroide, quale sarebbe la risposta?». Tali fisici immaginano di avere un quadro di riferimento (un laboratorio) inserito nella loro nave spaziale e di usarne gli strumenti per effettuare le misurazioni.

Einstein ha espresso il suo principio della relatività in termini di quadri di riferimento non arbitrari, quanto speciali: quadri (laboratori) che si muovono liberamente grazie alla propria inerzia, non spinti né attratti da alcuna forza, e che pertanto continuano a procedere sempre in avanti nello stesso stato di moto uniforme iniziale. Einstein chiamava questi quadri *inerziali* perché il loro moto è governato solo dalla loro inerzia.

Un quadro di riferimento connesso a un razzo in volo (un laboratorio all'interno del razzo) *non* è inerziale, perché il suo moto è influenzato dalla propulsione del razzo e dalla sua inerzia. La propulsione impedisce al moto del quadro di essere uniforme. Neanche un quadro di riferimento inserito in una navetta spaziale che rientra nell'atmosfera terrestre è inerziale, perché l'attrito tra la superficie della navetta e le molecole dell'aria della Terra rallentano la navetta, rendendo il suo moto non uniforme.

Cosa ancora più importante, quando si trovano vicino a un qualsiasi corpo massivo come la Terra, *tutti* i quadri di riferimento subiscono l'attrazione della sua gravità. Non c'è alcun modo di proteggere un quadro di riferimento (o qualsiasi altro oggetto) dall'attrazione gravitazionale. Pertanto, limitandosi ai quadri inerziali, Einstein evitava di prendere in considerazione, nel 1905, le situazioni fisiche in cui la gravità è importante[3]; in effetti egli ha ipotizzato

idealmente il nostro Universo come privo di qualsiasi gravità. Le astrazioni estreme come questa sono fondamentali per il progresso della fisica; ci si libera, concettualmente, di aspetti dell'Universo difficili da affrontare, e solo dopo aver stabilito il controllo intellettuale su ciò che resta gli aspetti più semplici ci riportano a quelli più difficili. Einstein stabilì il controllo intellettuale su un universo idealmente privo di gravità nel 1905. Poi si rivolse al compito più arduo di comprendere la natura dello spazio e del tempo nel nostro Universo reale dotato di gravità, un compito che alla fine lo avrebbe costretto a concludere che la gravità deforma lo spazio e il tempo (capitolo II).

Una volta compreso il concetto di quadro di riferimento inerziale, siamo pronti per una formulazione più profonda e precisa del principio della relatività di Einstein: *ogni legge fisica deve essere formulata in termini di misurazioni effettuate in un quadro di riferimento inerziale. Poi, una volta enunciata di nuovo in termini di misurazioni effettuate in qualsiasi altro quadro inerziale, la legge fisica deve assumere esattamente la stessa forma matematica e logica del quadro originario.* In altre parole, le leggi della fisica non devono fornire nessun mezzo per distinguere un quadro di riferimento inerziale (uno stato di moto uniforme) da un altro.

Due esempi di leggi fisiche chiariranno questo aspetto:

- «Un oggetto libero (ossia uno sul quale non agisce alcuna forza) che si trovi inizialmente in stato di quiete in un quadro di riferimento inerziale resterà sempre in stato di quiete; un oggetto libero che inizialmente si muova in un quadro di riferimento inerziale continuerà a muoversi per sempre in avanti, in linea retta a velocità costante». Se (come in questo caso) abbiamo un valido motivo di ritenere che questa versione relativistica della prima legge della dinamica di Newton sia vera in almeno un quadro di riferimento inerziale, per il principio della relatività essa deve essere vera in tutti i quadri di riferimento inerziali a prescindere da dove si trovino nell'Universo e dalla velocità del loro moto;
- Le leggi di Maxwell sull'elettromagnetismo devono assumere la stessa forma matematica in tutti i sistemi di riferimento. Ciò non avveniva quando la fisica si basava sui fondamenti newtoniani (le linee di un campo magnetico possono avere dei capi in alcuni quadri ma non in altri), e questa difformità disturbava profondamente Lorentz, Poincaré, Larmor e Einstein. Secondo la visione di Einstein, era assolutamente inaccettabile che le leggi fossero semplici ed eleganti in un quadro di riferimento, quello dell'etere, e complesse e disarmoniche in tutti i quadri che si muovevano relativamente

a quello dell'etere. Ricostruendo i fondamenti della fisica, Einstein ha permesso alle leggi di Maxwell di assumere un'unica e identica forma semplice ed elegante (ad esempio, «le linee di un campo magnetico non hanno mai fine») in ogni quadro di riferimento inerziale, in conformità con il suo principio della relatività.

Il principio della relatività è in realtà un *metaprincipio*, nel senso che non è di per sé una legge della fisica, quanto un modello o una norma che (affermava Einstein) deve essere rispettata da *tutte* le leggi della fisica, qualunque esse siano, a prescindere dal fatto che regolino l'elettricità o il magnetismo, gli atomi e le molecole, o i motori a vapore e le automobili sportive. La potenza di questo metaprincipio è tale da mozzare il fiato. Ogni nuova legge proposta deve passare al suo vaglio. Se supera il test (se la legge è la stessa in qualsiasi quadro di riferimento inerziale), allora vi è qualche speranza che la legge descriva il comportamento del nostro Universo. Se non la supera, non vi è nessuna speranza, affermava Einstein; essa deve essere respinta.

Tutti gli esperimenti effettuati nei quasi cento anni trascorsi dal 1905 confermano che Einstein aveva ragione. Tutte le nuove leggi che sono riuscite a descrivere l'Universo reale sono risultate conformi al principio della relatività di Einstein. Questo metaprincipio si è affermato come quello che governa le leggi fisiche.

Nel maggio del 1905, dopo che la discussione con Michele Angelo Besso aveva rimosso il suo blocco mentale e gli aveva consentito di abbandonare lo spazio e il tempo assoluti, ad Einstein bastarono solo poche settimane di riflessione e di calcoli per formulare i nuovi fondamenti della fisica e dedurne le conseguenze sulla natura dello spazio, del tempo e dell'elettromagnetismo e sul comportamento degli oggetti dotati di alte velocità. Due di tali conseguenze erano spettacolari: la massa può essere convertita in energia (che diventerà la premessa fondamentale per la costruzione della bomba atomica; si veda il capitolo VI), e l'inerzia di ogni oggetto, man mano che la sua velocità si avvicina alla velocità della luce, deve aumentare così rapidamente che, a prescindere dalla forza che gli venga impressa, non è possibile fargli superare la velocità della luce in alcun caso («niente può viaggiare più veloce della luce»)[4].

Alla fine di giugno Einstein scrisse un articolo tecnico in cui descriveva le sue idee e le loro conseguenze e lo spedì alla rivista «Annalen der Physik». L'articolo aveva un titolo alquanto banale, *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*. Ma era lungi dall'essere banale. Una rapida scorsa e ci si trovava

davanti a Einstein, «esperto tecnico di terza classe» dell'Ufficio dei brevetti svizzero, intento a proporre un principio fondamentale della fisica del tutto nuovo, a esporre un metaprincipio che tutte le future leggi della fisica avrebbero dovuto rispettare, a rivedere radicalmente i nostri concetti di spazio e tempo, e a trarne conseguenze spettacolari. Il nuovo principio fondamentale di Einstein e le sue conseguenze sarebbero presto divenuti noti come relatività ristretta («ristretta» perché descrive correttamente l'Universo solo in quelle situazioni speciali in cui la gravità non è rilevante).

L'articolo di Einstein pervenne alla redazione degli «Annalen der Physik» a Lipsia il 30 giugno 1905. La sua accuratezza e importanza vennero valutate e ritenute sufficienti e venne pubblicato.

Nelle settimane successive Einstein restò in trepidante attesa di una risposta da parte degli eminenti fisici dell'epoca. Il suo punto di vista e le sue conclusioni erano così radicali e poggiavano su basi sperimentali così limitate che si attendeva di ricevere critiche sferzanti e argomentazioni opposte. Invece, si ritrovò di fronte a un desolante silenzio. Infine, molte settimane dopo, giunse una lettera da Berlino: Max Planck voleva dei chiarimenti su alcuni aspetti tecnici dell'articolo. Einstein era fuori di sé dalla gioia! Ottenere l'attenzione di Max Planck, uno tra i più rinomati fisici viventi, era una enorme soddisfazione. E quando Planck, l'anno successivo, prese a utilizzare il principio della relatività come strumento principale delle sue ricerche, Einstein fu ulteriormente rincuorato. L'approvazione di Planck, quella graduale di altri fisici di punta e, cosa più importante, la sua suprema fiducia in se stesso fecero sì che Einstein si mantenesse saldo nei venti anni successivi in cui la discussione e le polemiche si scatenarono, in effetti, intorno alla sua teoria della relatività. La disputa era ancora così accesa nel 1922 che quando il segretario dell'Accademia svedese delle Scienze informò Einstein che aveva vinto il premio Nobel, il telegramma specificava che quello sulla relatività *non* figurava tra i lavori che gli erano valsi il riconoscimento.

La polemica si spense infine negli anni Trenta, quando la tecnologia progredì abbastanza da fornire accurate verifiche sperimentali delle previsioni della relatività ristretta. Nel momento in cui scrivo, negli anni Novanta, non vi è assolutamente alcun possibile dubbio: ogni giorno più di 10^{17} elettroni vengono portati a una velocità pari a 0,9999999995 della velocità della luce negli acceleratori di particelle della Stanford University, della Cornell University e in altri luoghi ancora, e i loro comportamenti a queste elevatissime velocità sono in pieno accordo con le leggi della fisica secondo la relatività ristretta di Einstein. Ad esempio, l'inerzia degli elettroni aumenta quando

essi si avvicinano alla velocità della luce, impedendo loro di eguagliarla; e quando collidono con gli obiettivi producono particelle ad alta velocità dette «mesoni mu» che vivono appena 2,22 microsecondi se misurati in base al loro tempo, ma 100 microsecondi o più, a causa della dilatazione del tempo, se misurati in base al tempo dei fisici in stato di quiete nel laboratorio.

La natura della legge fisica

Il successo della relatività speciale di Einstein significa che dobbiamo abbandonare del tutto le leggi newtoniane della fisica? Ovviamente no. Le leggi newtoniane sono ancora ampiamente valide nella vita quotidiana, nella maggior parte dei campi scientifici e tecnologici. Non badiamo alla dilatazione del tempo quando prenotiamo un volo aereo, e gli ingegneri non si preoccupano della contrazione della lunghezza quando progettano un aeroplano. La dilatazione e la contrazione sono troppo piccole per essere rilevanti.

Naturalmente, se volessimo *potremmo* usare le leggi di Einstein invece di quelle di Newton nella vita quotidiana. Entrambe forniscono quasi esattamente le stesse previsioni riguardo a tutti gli effetti fisici poiché la vita quotidiana comporta velocità relative molto piccole rispetto alla velocità della luce.

Le previsioni di Einstein e di Newton cominciano a divergere decisamente solo a velocità che si avvicinano a quella della luce. Allora e solo allora si devono abbandonare le previsioni di Newton e ci si deve attenere rigorosamente a quelle di Einstein.

Questo è un esempio di un modello generale che ritroveremo ancora nei capitoli seguenti. Un modello che si è ripetuto più e più volte nella storia della fisica del XX secolo: un insieme di leggi (nel nostro caso le *leggi newtoniane*) gode di ampia accettazione sulle prime, perché concorda elegantemente con i risultati sperimentali. Ma poi gli esperimenti si fanno più accurati e questo primo insieme di leggi risulta funzionare bene solo in un campo limitato, il suo *campo di validità* (per le leggi newtoniane il campo delle velocità piccole rispetto a quella della luce). Allora i fisici lottano, sul piano teorico e sperimentale, per capire cosa succede ai margini del campo di validità e infine formulano un nuovo insieme di leggi ampiamente applicabili all'interno, in prossimità dei margini e al di là di essi (nel caso newtoniano, la *relatività ristretta di Einstein*, valida sia a basse velocità sia a velocità prossime a quella della luce). Poi il processo si ripete. Incontreremo ripetizioni di

questo tipo nei capitoli seguenti: l'invalidità della relatività ristretta nelle situazioni in cui la gravità diventa importante e la sua sostituzione con un nuovo insieme di leggi chiamato *relatività generale* (capitolo II); l'invalidità della relatività generale in prossimità di una singolarità all'interno di un buco nero e la sua sostituzione con un nuovo insieme di leggi chiamato *gravità quantistica* (capitolo XIII).

Ogni transizione da un vecchio insieme di leggi a uno nuovo ha avuto una caratteristica stupefacente: in nessun caso i fisici (se erano abbastanza intelligenti) hanno avuto bisogno di indicazioni sperimentali per capire dove avrebbero cominciato ad aprirsi le crepe nel vecchio insieme, ossia per sapere dove si trovava il margine del suo campo di validità. L'abbiamo già visto nel caso della fisica newtoniana: le leggi di Maxwell sull'elettromagnetismo non si adattavano armoniosamente con lo spazio assoluto della fisica newtoniana. In stato di quiete nello spazio assoluto (nel quadro dell'etere) le leggi di Maxwell erano semplici ed eleganti – ad esempio, le linee di un campo magnetico non hanno fine. Nei quadri in movimento esse diventavano complicate e disarmoniche – le linee di un campo magnetico a volte hanno fine. Tuttavia, le complicazioni influivano in modo trascurabile sull'esito degli esperimenti quando il quadro si muoveva, relativamente allo spazio assoluto, a velocità basse rispetto a quella della luce; in quel caso quasi tutte le linee di campo sono infinite. Solo a velocità prossime a quella della luce le sgradevoli complicazioni previste esercitavano un'influenza abbastanza grande da poter essere misurata facilmente: molte linee avevano una fine. Perciò era ragionevole supporre, anche senza l'esperimento di Michelson-Morley, che il campo di validità della fisica newtoniana fossero le velocità basse rispetto a quella della luce, e che le leggi newtoniane venissero violate quando ci si avvicinava a quest'ultima.

Analogamente, nel capitolo II vedremo come la relatività speciale preveda la propria invalidità in presenza di gravità; e nel capitolo XIII come la relatività generale preveda la propria invalidità in prossimità di una singolarità.

Quando osserva questa sequenza di insiemi di leggi (fisica newtoniana, relatività ristretta, relatività generale, gravità quantistica) – e una sequenza simile di leggi che governano la struttura della materia e delle particelle elementari – la maggior parte dei fisici è portata a credere che esse convergano verso un insieme di leggi definitivamente vere che governano l'Universo, leggi che *obbligano* l'Universo a comportarsi così come fa, che *obbligano* la pioggia a condensarsi sui vetri delle finestre, il Sole a bruciare combustibile nucleare, i buchi neri a produrre onde gravitazionali quando collidono e così via.

Si potrebbe obiettare che ogni corpus di leggi della sequenza «sembra» molto diverso dal precedente (ad esempio, il tempo assoluto della fisica newtoniana sembra assai differente dai molteplici flussi temporali diversi della relatività ristretta). Nel loro «aspetto» le leggi non mostrano alcun segno di convergenza. Perché mai dovremmo quindi aspettarcela? La risposta è che bisogna distinguere attentamente tra le previsioni formulate da un corpus di leggi e le immagini mentali che queste ultime portano con sé (il modo in cui esse «appaiono»). Mi aspetto una convergenza solo in termini di previsioni, ma questo è tutto ciò che conta, in ultima analisi. Le immagini mentali (un tempo assoluto nella fisica newtoniana contrapposto ai molteplici flussi temporali della fisica relativistica) non sono importanti per la natura ultima della *realtà*. Infatti, è possibile cambiare completamente l'«aspetto» di un insieme di leggi senza modificarne le previsioni. Nel capitolo XI discuterò questo fatto degno di nota, fornirò degli esempi e ne spiegherò le implicazioni per la natura della realtà.

Perché mi aspetto una convergenza in termini di previsioni? Perché tutte le prove che abbiamo vanno in questa direzione. Ogni corpus di leggi presenta un campo di validità più ampio di quello precedente: le leggi di Newton funzionano in tutti gli aspetti della vita quotidiana, ma non negli acceleratori di particelle dei fisici né in parti esotiche dell'Universo remoto, come i quasar, le pulsar e i buchi neri; le leggi della relatività generale di Einstein funzionano benissimo ovunque, nei nostri laboratori e nell'Universo distante, a eccezione delle profondità dei buchi neri e nel Big Bang da cui è nato l'Universo; le leggi della gravità quantistica (che non comprendiamo ancora del tutto) potrebbero risultare perfettamente funzionanti ovunque.

In questo libro adotto il punto di vista, e non me ne scuso, secondo cui *esiste* un insieme ultimo di leggi fisiche (che ancora non conosciamo, ma che potrebbe essere la gravità quantistica) e che tali leggi *governano* realmente l'Universo intorno a noi, ovunque. Esse *obbligano* l'Universo a comportarsi come si comporta. Volendo essere molto precisi, dirò che le leggi con cui lavoriamo attualmente (ad esempio la relatività generale) sono «un'approssimazione» o una «descrizione approssimativa» delle vere leggi. Tuttavia, in generale eviterò gli aggettivi e non farò distinzione tra le vere leggi e le approssimazioni che ne diamo. A volte, pertanto, affermerò ad esempio che «le leggi della relatività generale [anziché le vere leggi] obbligano un buco nero a trattenere la luce con tale forza che essa non può fuoriuscire dal suo orizzonte». È così che io e i fisici miei colleghi pensiamo quando ci sforziamo di comprendere l'Universo. È un modo di pensare proficuo, che ha contri-

buito a farci comprendere meglio le stelle che implodono, i buchi neri, le onde gravitazionali e altri fenomeni.

Questo punto di vista è incompatibile con l'opinione comune secondo cui i fisici lavorano con delle *teorie* che cercano di descrivere l'Universo, ma che sono solo invenzioni degli esseri umani e non hanno alcun potere reale su di esso. La parola *teoria* è così carica di aleatorietà ed eccentricità che eviterò di usarla ogniqualvolta possibile. Al suo posto userò invece la dicitura *legge fisica*, che evoca decisamente qualcosa capace di governare davvero l'Universo, ossia di obbligare davvero l'Universo a comportarsi come si comporta.

II. LA DEFORMAZIONE DELLO SPAZIO E DEL TEMPO

Dove Hermann Minkowski
unifica lo spazio e il tempo
ed Einstein li deforma

Lo spaziotempo assoluto di Minkowski

«Le concezioni dello spazio e del tempo che intendo presentarvi sono scaturite dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò risiede la loro forza. Esse sono radicali. D'ora in poi lo spazio in sé e il tempo in sé sono condannati a dissolversi in pure ombre e solo una specie di unione dei due conserverà un'esistenza indipendente».

Con queste parole Hermann Minkowski rivelava al mondo nel settembre del 1908 una nuova scoperta sulla natura dello spazio e del tempo. Einstein aveva dimostrato che lo spazio e il tempo sono «relativi». La lunghezza di un oggetto e il flusso del tempo sono diversi quando vengono osservati da quadri di riferimento diversi. Il mio tempo differisce dal vostro, se mi muovo rispetto a voi, e il mio spazio differisce dal vostro. Il mio tempo è una mescolanza del vostro tempo e del vostro spazio; il mio spazio è una mescolanza del vostro spazio e del vostro tempo.

Minkowski, basandosi sulle ricerche di Einstein, aveva ora scoperto che l'Universo è costituito da un tessuto «spaziotemporale» quadridimensionale che è assoluto e non relativo. Questo tessuto a quattro dimensioni appare lo stesso da qualsiasi quadro di riferimento (se solo si potesse imparare a «vederlo»); esiste indipendentemente dai quadri di riferimento.

Il racconto seguente (adattato da Taylor e Wheeler, 1992) illustra l'idea che sta alla base della scoperta di Minkowski.

C'era una volta, su un'isola dei mari dell'estremo Oriente chiamata Mledina, una popolazione che aveva abitudini e tabù particolari. Ogni giugno,

nel giorno più lungo dell'anno, tutti gli uomini di Mledina si recavano a bordo di una grande nave a vela in una lontana isola sacra chiamata Serona per comunicare con un rospo enorme. Per tutta la notte il rospo li avrebbe incantati con meravigliosi racconti su stelle e galassie, pulsar e quasar. Il giorno dopo gli uomini sarebbero salpati di nuovo per tornare a Mledina colmi delle visioni che avrebbero dato loro forza per tutto l'anno seguente.

Ogni dicembre, nella notte più lunga dell'anno, le donne di Mledina navigavano fino a Serona per comunicare con lo stesso rospo tutto il giorno seguente e tornavano la notte successiva ispirate dalle visioni delle stelle, delle galassie, delle pulsar e dei quasar trasmesse loro dal rospo.

Ma un tabù assoluto vietava a qualsiasi donna di Mledina di descrivere a qualsiasi uomo di Mledina il suo viaggio all'isola sacra di Serona o qualsiasi dettaglio dei racconti del rospo. Gli uomini rispettavano lo stesso tabù. Non avrebbero mai dovuto rivelare nulla alle donne del loro viaggio annuale.

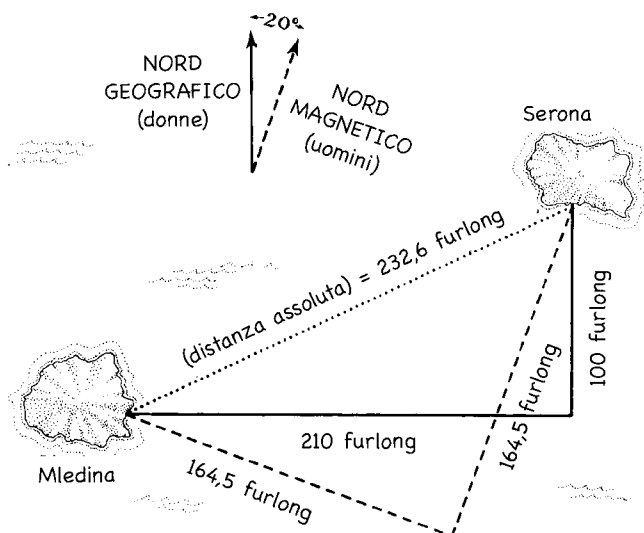
Nell'estate del 1905 un giovane radicale di Mledina di nome Albert, che non si curava molto dei tabù della sua cultura, scoprì e illustrò a tutti gli abitanti di Mledina, uomini e donne, due mappe sacre. Una era quella con cui la sacerdotessa di Mledina pilotava la barca delle donne durante il loro viaggio nel cuore dell'inverno. L'altra era la mappa usata dal sacerdote di Mledina per il viaggio degli uomini nel cuore dell'estate. Come si vergognavano, gli uomini, nel vedere esposta in pubblico la loro mappa sacra. La vergogna provata dalle donne non era da meno. Ma le mappe erano lì, visibili a tutti, e contenevano un elemento sbalorditivo: non concordavano sull'ubicazione di Serona. Le donne navigavano verso est per 210 furlong e poi verso nord per 100 furlong, mentre gli uomini navigavano verso est per 164,5 furlong e poi verso nord per altri 164,5. Come era possibile? La tradizione religiosa non consentiva dubbi; le donne e gli uomini dovevano cercare ogni anno ispirazione dallo stesso rospo sacro sulla stessa isola sacra di Serona.

La maggior parte degli abitanti di Mledina reagì al proprio sentimento di vergogna ritenendo false le mappe. Ma un vecchio saggio dell'isola di nome Hermann vi prestò fede. Per tre anni si dedicò a cercare di svelare il mistero della loro discrepanza. Infine, in un giorno d'autunno del 1908, la verità si palesò ai suoi occhi: gli uomini di Mledina dovevano seguire la loro rotta basandosi sulla bussola magnetica, e le donne basandosi sulle stelle (figura 2.1). Gli uomini di Mledina calcolavano la posizione del nord e dell'est magneticamente, le donne invece in base alla rotazione della Terra, che fa ruotare le stelle lassù in alto, e i due metodi di calcolo presentavano una differenza di 20 gradi. Quando gli uomini navigavano verso nord, secondo i loro calcoli, in realtà na-

vigavano verso «nord, 20 gradi est», ossia 80% in direzione nord e 20% in direzione est; analogamente, il nord delle donne era un misto del nord e dell'ovest degli uomini.

La chiave che portò Hermann a questa scoperta era la formula di Pitagora: prendete i due cateti di un triangolo rettangolo, calcolate il quadrato dell'uno e dell'altro, sommateli ed estraetene la radice quadrata. Il risultato dovrebbe dare la lunghezza dell'ipotenusa del triangolo.

L'ipotenusa era la linea retta che andava da Mledina a Serona. La distanza assoluta lungo la rotta in linea retta era pari a $\sqrt{210^2 + 100^2} = 232{,}6$ furlong in base alla mappa delle donne con i cateti orientati in direzione dell'est geografico e del nord geografico. Calcolata secondo la mappa degli uomini con i cateti orientati in direzione dell'est magnetico e del nord magnetico la distanza assoluta era pari a $\sqrt{164{,}5^2 + 164{,}5^2} = 232{,}6$ furlong. La distanza verso est e quella verso nord erano «relative», dipendevano dal fatto che il quadro di riferimento fosse quello magnetico o quello geografico. Ma a partire da ognuna delle coppie di distanze relative si poteva calcolare la stessa distanza assoluta in linea retta.

2.1 – Le due mappe della rotta da Mledina a Serona sovrapposte l'una sull'altra, con le indicazioni del nord magnetico, del nord geografico e della distanza assoluta apposte da Hermann.

La storia non riporta quale sia stata la reazione degli abitanti di Mledina, con i tabù della loro cultura, di fronte a questa meravigliosa scoperta.

La scoperta di Hermann Minkovski era analoga a quella di Hermann di Mledina: supponete di muovervi relativamente a me (ad esempio nella vostra automobile sportiva ultraveloce), in tal caso:

- Come il nord magnetico è un misto di nord geografico e di est geografico, anche il mio tempo è un misto del vostro tempo e del vostro spazio;
- Come l'est magnetico è un misto di est geografico e di sud geografico, il mio spazio è un misto del vostro spazio e del vostro tempo;
- Come il nord e l'est magnetici e il nord e l'est geografici sono solo modi diversi di effettuare misurazioni su una superficie bidimensionale preesistente, la superficie della Terra, il mio spazio e il mio tempo, e il vostro spazio e il vostro tempo, sono solo due modi diversi di effettuare misurazioni su una «superficie» o «tessuto» quadridimensionale preesistente che Minkovski ha chiamato *spaziotempo*;
- Come vi è una distanza assoluta, lineare sulla superficie terrestre, che va da Mledina a Serona, calcolabile in base alla formula di Pitagora utilizzando le distanze misurate rispetto al nord e all'est magnetici o al nord e all'est geografici, anche tra due *eventi* qualsiasi nello spaziotempo vi è un intervallo lineare assoluto calcolabile in base a una formula analoga a quella di Pitagora utilizzando lunghezze e tempi misurati nell'uno o nell'altro quadro di riferimento, il mio o il vostro.

È stata questa formula analoga a quella di Pitagora (che chiamerò *formula di Minkowski*) a portare Minkowski alla scoperta dello spaziotempo assoluto.

I particolari della formula di Minkowski *non* saranno importanti ai fini della continuazione di questo libro. Non occorre quindi studiarli (tuttavia, per i lettori curiosi sono riportati nella scheda 2.1). La sola cosa importante è che gli eventi nello spaziotempo sono analoghi a punti nello spazio, e vi è un intervallo assoluto tra due eventi qualsiasi nello spaziotempo analogo alla distanza assoluta rettilinea tra due punti sulla superficie di un foglio di carta. L'assolutezza di questo intervallo (il fatto che il suo valore sia lo stesso, a prescindere dal quadro di riferimento adottato per calcolarlo) dimostra che lo spaziotempo possiede una realtà assoluta; è un tessuto quadridimensionale dotato di proprietà che sono indipendenti dal moto di un soggetto.

Come vedremo nelle pagine seguenti, la gravità è prodotta da una curvatura

(una deformazione) del tessuto quadridimensionale, assoluto, dello spaziotempo, e i buchi neri, i cunicoli temporali, le onde gravitazionali e le singolarità sono tutti costruiti interamente e unicamente a partire da questo tessuto; ossia, ognuno di essi è un tipo specifico di deformazione dello spaziotempo.

Poiché il tessuto assoluto dello spaziotempo è responsabile di questi fenomeni affascinanti, è frustrante che io e voi non possiamo farne esperienza nella nostra vita quotidiana. Il difetto sta nella bassa velocità della nostra tecnologia (ad esempio, automobili sportive che viaggiano molto più lente della velocità della luce). A causa delle nostre basse velocità relative sperimentiamo lo spazio e il tempo solo come entità separate, non notiamo mai le discrepanze tra le lunghezze e i tempi che misuriamo voi e io (non notiamo mai che lo spazio e il tempo sono relativi), e non ci accorgiamo mai che i nostri spazi e tempi relativi sono uniti e formano il tessuto quadridimensionale assoluto dello spaziotempo.

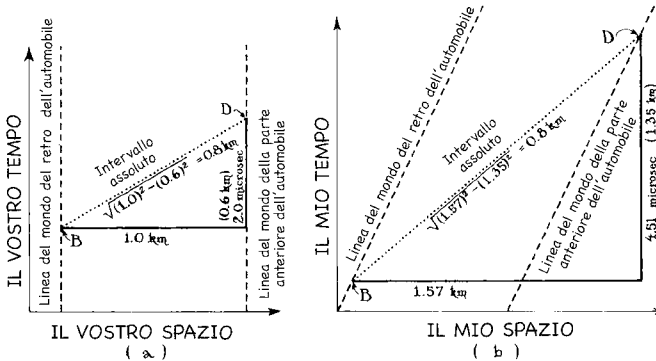
Come forse ricorderete, Minkowski è il professore di matematica che aveva definito Einstein, quando era studente, un cane pigro. Nel 1902, Minkowski, russo di nascita, aveva lasciato l'ETH di Zurigo per un incarico più attraente come professore a Göttingen, in Germania (all'epoca la scienza era internazionale quanto lo è oggi). A Göttingen Minkowski studiò l'articolo di Einstein sulla relatività speciale e ne rimase impressionato. Quello studio lo portò nel 1908 a scoprire la natura assoluta dello spaziotempo quadridimensionale.

Quando Einstein venne a conoscenza della scoperta di Minkowski *non* rimase impressionato. Minkowski stava soltanto riscrivendo le leggi della relatività ristretta in un nuovo linguaggio, più matematico e, per Einstein, la matematica oscurava le idee fisiche che stavano alla base delle leggi. Mentre Minkowski continuava a esaltare la bellezza della sua visione dello spaziotempo, Einstein cominciò a fare battute sui matematici di Göttingen che descrivevano la relatività con un linguaggio talmente complicato che i fisici non riuscivano a capirlo.

Ma lo scherzo in effetti si ritorse proprio contro Einstein. Quattro anni dopo, nel 1912, egli si rese conto che lo spaziotempo assoluto di Minkowski era un principio fondamentale per poter incorporare la gravità nella relatività ristretta. Purtroppo, Minkowski non visse abbastanza per assistere a tutto ciò, poiché morì di appendicite nel 1909, all'età di quarantacinque anni.

Tornerò sullo spaziotempo assoluto di Minkowski più avanti. Ora devo sviluppare un altro filone della mia storia: la legge gravitazionale di Newton e i primi tentativi di Einstein di riconciliarla con la relatività speciale, tentativi che fece prima di cominciare ad apprezzare la scoperta di Minkowski.

Scheda 2.1
LA FORMULA DI MINKOWSKI

Mi sfrecciate accanto a bordo di una potente macchina sportiva lunga un chilometro alla velocità di 162.000 chilometri al secondo (54% della velocità della luce); richiamate alla memoria la figura 1.3. Il moto della vostra automobile è riportato nei seguenti diagrammi spaziotemporali. Il diagramma (a) è tracciato dal vostro punto di vista, il (b) dal mio. Quando mi passate accanto, la vostra auto ha un ritorno di fiamma ed emette una nuvola di fumo dal tubo di scappamento; questo evento è indicato con *B* nei diagrammi. Due microsecondi (due milionesimi di secondo) dopo, così come appare a voi, un petardo collocato sul vostro paraurti anteriore esplode; l'evento della detonazione è indicato con *D*.

Dato che lo spazio e il tempo sono relativi (il vostro spazio è un misto del mio spazio e del mio tempo), voi e io dissentiamo sul tempo che intercorre tra l'evento *B*, il ritorno di fiamma, e l'evento *D*, l'esplosione del petardo. Essi sono separati da 2,0 microsecondi del vostro tempo e da 4,51 microsecondi del mio. Analogamente, dissentiamo sulla separazione spaziale degli eventi; la distanza è di 1,0 chilometri nel vostro spazio e di 1,57 chilometri nel mio. Malgrado questi disaccordi temporali e spaziali, *concordiamo* sul fatto che i due eventi siano separati da una linea retta nello spaziotempo quadridimensionale e che l'«intervallo assoluto» lungo quella linea (la lunghezza spaziotemporale della linea) sia di 0,8 chilometri (la situazione

è analoga a quella degli uomini e delle donne di Mledina che concordavano sulla distanza in linea retta tra Mledina e Serona).
Possiamo utilizzare la formula di Minkowski per calcolare l'intervallo assoluto: ciascuno di noi moltiplica il tempo di separazione tra i due eventi per la velocità della luce (299.792 chilometri al secondo) e otteniamo le cifre arrotondate indicate nei diagrammi (0,600 chilometri per voi, 1,35 chilometri per me). Poi eleviamo al quadrato le distanze spaziali e temporali tra i due eventi, *sottraiamo* il quadrato della distanza temporale dal quadrato della distanza spaziale e ne estraiamo la radice quadrata (l'operazione è analoga a quella degli abitanti di Mledina che elevavano al quadrato le distanze in direzione nord e in direzione est, le *sommavano* e ne estraevano la radice quadrata). Come si vede dai diagrammi, sebbene le vostre distanze temporali e spaziali differiscano dalle mie, otteniamo lo stesso risultato finale circa l'intervallo assoluto: 0,8 chilometri.
C'è una sola differenza importante tra la formula di Minkowski che applichiamo io e voi e quella di Pitagora applicata dagli abitanti di Mledina: i quadrati delle nostre distanze vanno sottratti anziché sommati. Questa sottrazione è intimamente connessa alla differenza fisica tra lo spaziotempo che stiamo esplorando noi e la superficie terrestre esplorata dagli abitanti di Mledina – ma a costo di farvi infuriare rinuncerò a spiegare questa connessione e vi rimanderò semplicemente alle discussioni illustrate da Taylor e Wheeler (1992).

La legge gravitazionale di Newton e i primi tentativi di Einstein di sposarla con la relatività

Newton concepiva la gravità come la forza che agisce tra ogni coppia di oggetti nell'Universo, una forza che attrae gli oggetti l'uno verso l'altro. Più le masse degli oggetti sono grandi e più essi sono vicini, maggiore è la forza. Per darne una formulazione più precisa, la forza è proporzionale al prodotto delle masse degli oggetti e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

Questa legge gravitazionale costituiva un enorme trionfo intellettuale. Combinata con le leggi di Newton sul moto, spiegava le orbite dei pianeti attorno al Sole e delle lune attorno ai pianeti, le alte e basse maree degli

oceani e la caduta delle rocce; e ha insegnato a Newton e ai suoi compatrioti del XVII secolo a calcolare il peso del Sole e della Terra[1].

Durante i due secoli che separano Newton e Einstein le misurazioni delle orbite celesti effettuate dagli astronomi sono diventate sempre più accurate, sottoponendo la legge gravitazionale di Newton a test sempre più stringenti. Di tanto in tanto delle nuove misurazioni astronomiche risultavano in contrasto con la legge di Newton, ma alla lunga esse, o le loro interpretazioni, finivano per rivelarsi sbagliate. La legge di Newton continuava a superare i test sperimentali e gli errori intellettuali. Ad esempio, quando il moto del pianeta Urano (che era stato scoperto nel 1781) sembrò violare le previsioni della legge gravitazionale di Newton, si pensò che probabilmente la gravità di qualche altro pianeta sconosciuto esercitasse su di esso la sua attrazione, alterandone l'orbita. I calcoli effettuati da U.J.J. Le Verrier, basati unicamente sulle leggi della gravità e del moto di Newton, indicavano in quale parte del cielo avrebbe dovuto trovarsi quel nuovo pianeta. Nel 1846, quando J.G. Galle puntò il suo telescopio su quel punto, il pianeta previsto era lì, troppo pallido per essere scorto a occhio nudo, ma luminoso abbastanza per il suo telescopio. Il nuovo pianeta, che rendeva giustizia alla legge gravitazionale di Newton, venne battezzato Nettuno.

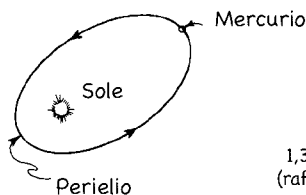
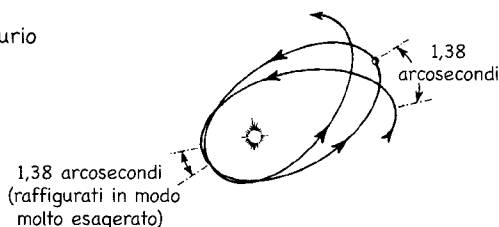
Ai primi del Novecento restavano altre due piccole ma fastidiose discrepanze rispetto alla legge gravitazionale di Newton. Una di esse, una particolarità nell'orbita del pianeta Mercurio, avrebbe finito per rivelare un difetto della legge di Newton. L'altra, una particolarità nell'orbita della Luna, alla fine sarebbe scomparsa, rivelandosi un'interpretazione erronea delle misurazioni degli astronomi. Come spesso accade con le misurazioni estremamente precise, era difficile stabilire quale delle due discrepanze, eventualmente, avrebbe dovuto essere fonte di preoccupazione.

Einstein ipotizzò correttamente che la particolarità di Mercurio (uno slittamento anomalo del *perielio*; scheda 2.2) fosse reale, e quella della Luna no. La particolarità di Mercurio «aveva l'aria» di essere autentica, quella della Luna no. Tuttavia, questo ipotizzato disaccordo dell'esperimento con la legge gravitazionale di Newton per Einstein era molto meno interessante e importante della sua convinzione che tale legge si sarebbe rivelata in contrasto con il suo nuovo principio della relatività (il «metaprincipio» secondo cui tutte le leggi della fisica devono essere le stesse in ogni quadro di riferimento inerziale). Dato che Einstein credeva fermamente nel principio della relatività, una simile violazione significava che la legge gravitazionale di Newton doveva essere errata[2].

Il ragionamento di Einstein era semplice: secondo Newton, la forza gravi-

Scheda 2.2

LO SLITTAMENTO DEL PERIELIO DI MERCURIO

Keplero aveva descritto l'orbita di Mercurio come un'ellisse che aveva il Sole in uno dei suoi fuochi (diagramma di sinistra, dove l'allungamento ellittico dell'orbita è stato esagerato). Tuttavia, verso la fine dell'Ottocento, gli astronomi avevano dedotto dalle loro osservazioni che l'orbita di Mercurio non è proprio ellittica. Ogni volta che compie un'orbita, Mercurio viene a trovarsi di pochissimo in una posizione diversa da quella iniziale. Questa mancata coincidenza può essere descritta come uno slittamento, a ogni orbita, nell'ubicazione del punto in cui Mercurio è più vicino al Sole (uno slittamento del suo *perielio*). Gli astronomi hanno misurato uno slittamento del perielio pari a 1,38 arcosecondi a ogni orbita (diagramma di destra, in cui si è esagerato lo slittamento).
La legge gravitazionale di Newton poteva dar conto di 1,28 arcosecondi su 1,38 totali: lo slittamento era dovuto all'attrazione gravitazionale di Giove e di altri pianeti su Mercurio. Tuttavia, restava una discrepanza di 0,10 arcosecondi: *uno slittamento anomalo di 0,10 arcosecondi del perielio di Mercurio a ogni orbita*. Gli astronomi affermavano che il margine di errore e di incertezza nelle loro misurazioni ammontava soltanto a 0,01 arcosecondi, ma considerando l'esiguità degli angoli misurati (0,01 arcosecondi equivalgono all'angolo sotteso da un capello a una distanza di 2 chilometri), non sorprende che la maggior parte dei fisici della fine del XIX secolo e degli inizi del XX fosse scettica e si aspettasse che alla fine la legge di Newton avrebbe trionfato ancora.

tazionale dipende dalla *distanza* tra i due oggetti gravitanti (ad esempio, il Sole e Mercurio), ma secondo la relatività tale distanza è diversa in quadri di riferimento diversi. Ad esempio, la legge della relatività di Einstein prevede che la distanza tra il Sole e Mercurio differisca di circa una parte su un miliardo a seconda che ci si trovi, quando si effettua la misurazione, sulla superficie di Mercurio o su quella del Sole. Se entrambi i quadri di riferimento, quello di Mercurio e quello del Sole, sono altrettanto validi agli occhi delle leggi della fisica, quale di essi dovrebbe essere usato per misurare la distanza che si manifesta nella legge gravitazionale di Newton? Entrambe le scelte, il quadro di Mercurio o quello del Sole, avrebbero violato il principio della relatività. Questa difficoltà convinse Einstein che la legge gravitazionale di Newton doveva essere errata.

L'audacia di Einstein lascia sgomenti. Dopo aver scartato lo spazio e il tempo assoluti di Newton quasi senza giustificazioni sperimentali, ora era pronto a rinunciare anche alla sua legge gravitazionale che aveva superato brillantemente così tante prove, e con giustificazioni sperimentali ancora minori. Tuttavia, la sua convinzione non nasceva dagli esperimenti, ma dalla sua profonda comprensione intuitiva di come *dovevano* funzionare le leggi della fisica.

Einstein iniziò la sua ricerca di una nuova legge della gravità nel 1907. I suoi primi tentativi nacquero e furono guidati da un progetto di scrittura: sebbene l'Ufficio brevetti gli attribuisse solo la qualifica di «esperto tecnico di seconda classe» (da poco promosso dalla terza classe), egli era abbastanza rispettato dai grandi fisici del mondo da essere invitato a scrivere una rassegna per la pubblicazione annuale *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* sulle sue leggi fisiche della relatività ristretta e sulle loro conseguenze. Lavorando a questa rassegna, Einstein scoprì una strategia proficua per la ricerca scientifica: la necessità di esporre una tesi in una forma limitata nell'estensione, coerente e divulgativa, obbliga a ripensarvi in modo nuovo. Si è portati a riesaminarne tutte le carenze e i punti deboli e a porvi rimedio.

La gravità costituiva la principale limitazione della sua tesi; la relatività ristretta, con i suoi quadri inerziali su cui nessuna forza gravitazionale poteva influire, trascurava completamente questo aspetto. Perciò, mentre scriveva, Einstein continuava a cercare dei modi per inserire la gravità nelle sue leggi relativistiche. Come accade a molti quando sono immersi in un dilemma, anche quando non ci pensava direttamente, la mente di Einstein continuava a riflettere sulla questione. Accadde così che un giorno di novembre del

1907, per usare le parole dello stesso Einstein, «ero seduto nell'Ufficio brevetti di Berna, quando all'improvviso mi venne in mente un pensiero: "Un individuo in caduta libera non avverte il proprio peso"».

Voi e io avremmo potuto avere questo pensiero, e non avrebbe portato a niente. Ma Einstein era diverso. Egli portava le idee fino alle estreme conseguenze, e da esse carpiva ogni brandello di conoscenza possibile. E questa era un'idea chiave, che indicava una visione nuova e rivoluzionaria della gravità. Egli lo definì in seguito «il pensiero più felice della mia vita».

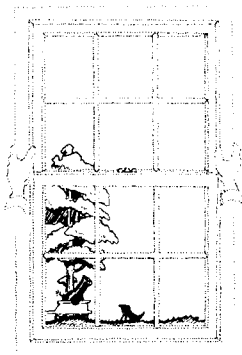
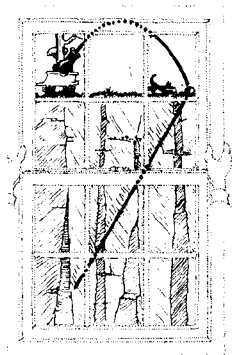
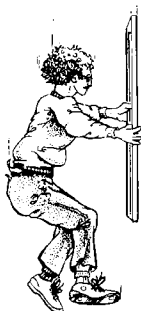
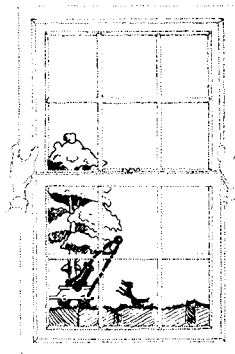
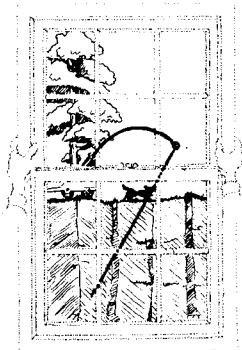
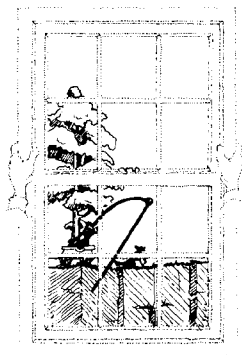
Le conseguenze di questo pensiero non tardarono a manifestarsi e vennero immortalate nell'articolo di Einstein. Se vi trovaste in caduta libera (ad esempio saltando giù da una scogliera), non solo non avvertireste il vostro peso, ma avreste l'impressione, sotto tutti gli aspetti, che la gravità sia completamente scomparsa dallo spazio circostante. Ad esempio, se durante la caduta lasciaste cadere delle pietre dalla mano, continuereste a precipitare insieme a esse, fianco a fianco. Se le osservaste ignorando altri elementi circostanti, non riuscireste a capire se state precipitando verso il terreno sottostante o se state galleggiando liberamente nello spazio, lontano da tutti i corpi gravitanti. In effetti, come comprese Einstein, nelle vostre immediate vicinanze, la gravità è così irrilevante, così impossibile da notare, che tutte le leggi della fisica, in un quadro di riferimento piccolo (un laboratorio) che portate durante la caduta, devono essere le stesse che esisterebbero se vi steste muovendo liberamente in un universo senza gravità. In altre parole, il vostro quadro di riferimento, piccolo e in caduta libera, è «equivalente a» un quadro di riferimento inerziale in un universo privo di gravità, e le leggi della fisica che sperimentate sono le stesse di un quadro di riferimento inerziale privo di gravità; esse sono le leggi della relatività ristretta (vedremo in seguito perché il quadro di riferimento deve essere mantenuto piccolo e che «piccolo» significa molto piccolo rispetto alle dimensioni della Terra – o, più in generale, molto piccolo rispetto alla distanza oltre la quale la forza e la direzione della gravità cambiano).

Come esempio dell'equivalenza tra un quadro di riferimento inerziale privo di gravità e il vostro piccolo quadro in caduta libera pensate alla legge della relatività ristretta che descrive il moto di un oggetto che si muove liberamente (supponiamo una palla di cannone) in un universo senza gravità. Misurata in qualsiasi quadro inerziale in questo universo idealizzato, la palla deve muoversi in linea retta e a velocità uniforme. Confrontate questa situazione con il movimento della palla nel nostro Universo reale dotato di gravità: se la palla viene sparata da un cannone piazzato in un prato erboso sulla Terra ed è osservata da un cane seduto sull'erba, la palla si innalza, compie

un arco e ricade sulla Terra (figura 2.2). Essa si muove lungo una parabola (la curva nera intera), se misurata nel quadro di riferimento del cane. Einstein vi chiede di guardare questa stessa palla di cannone a partire da un quadro di riferimento piccolo e in caduta libera. Ciò è più facile se il prato si trova sull'orlo di un precipizio. In questo caso potete saltare giù appena la palla di cannone viene sparata e osservarla mentre cadete.

Per aiutarvi a illustrare ciò che vedete durante la caduta, immaginate di tenere davanti a voi una finestra con dodici riquadri di vetro e di osservare la palla di cannone attraverso di essa (parte centrale della figura 2.2). Mentre cadete, vedete la sequenza di eventi che si succedono in senso orario indicata nella figura 2.2. Osservando tale sequenza, ignorate il cane, il cannone, l'albero e il precipizio; concentratevi solo sui riquadri della vostra finestra e sulla palla. Vista da voi, relativamente ai riquadri della vostra finestra, la palla si muove lungo la linea retta tratteggiata a velocità costante.

Quindi, nel quadro di riferimento del cane, la palla obbedisce alle leggi di Newton; si muove lungo una parabola. Nel vostro quadro di riferimento, piccolo e in caduta libera, essa obbedisce alle leggi della relatività speciale in assenza di gravità; si muove in linea retta a velocità costante. E ciò che risulta vero in questo esempio deve essere vero in generale, concluse Einstein con un grande balzo intuitivo: *in qualsiasi quadro di riferimento piccolo e in caduta libera, in qualsiasi parte del nostro Universo reale e dotato di gravità, le leggi della fisica devono essere le stesse che operano in un quadro di riferimento inerziale in un universo idealizzato privo di gravità*. Einstein chiamò questo principio *principio di equivalenza*, perché afferma che quadri piccoli e in caduta libera, in presenza di gravità, sono equivalenti a quadri inerziali in assenza di gravità.

Come Einstein comprese, questa affermazione aveva una conseguenza di enorme importanza: essa implicava che dando semplicemente il nome di «quadro di riferimento inerziale» a qualsiasi quadro di riferimento piccolo e in caduta libera nel nostro Universo reale dotato di gravità (ad esempio, a un piccolo laboratorio che trasportate mentre cadete giù dal precipizio), tutto ciò che la relatività ristretta afferma circa i quadri di riferimento inerziali in un universo idealizzato privo di gravità sarà automaticamente vero anche nel nostro Universo reale. Cosa ancor più importante, il principio della relatività deve essere vero: tutti i quadri di riferimento piccoli e inerziali (in caduta libera) nel nostro Universo reale dotato di gravità devono essere «creati uguali»; nessuno può essere preferito a un altro agli occhi delle leggi della fisica. O, per dirlo in modo più preciso (si veda il capitolo I): *formulate qualsiasi legge della*

2.2 – *Al centro*: Saltate giù da un precipizio tenendo in mano di fronte a voi una finestra con dodici riquadri di vetro. Il resto della figura, in senso orario dall'alto: Ciò che vedete attraverso la finestra quando il cannone spara; Relativamente al quadro in caduta della finestra la traiettoria della palla è la linea retta tratteggiata; relativamente al cane e alla superficie della Terra, è la parabola dal tratto intero.

fisica in termini di misurazioni effettuate in un quadro di riferimento piccolo e inerziale (in caduta libera). Una volta riaffermata in termini di misurazioni effettuate in qualsiasi altro quadro di riferimento piccolo e inerziale (in caduta libera), tale legge della fisica deve assumere esattamente la stessa forma matematica e logica del quadro originario. E ciò deve essere vero sia che il quadro inerziale (in caduta libera) si trovi nello spazio intergalattico privo di gravità, sia che stia cadendo giù da un precipizio sulla Terra, sia che si trovi al centro della nostra galassia, o che stia precipitando oltre l'orizzonte di un buco nero.

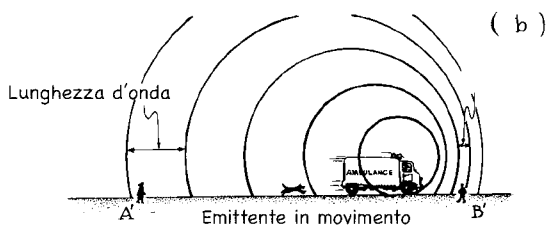
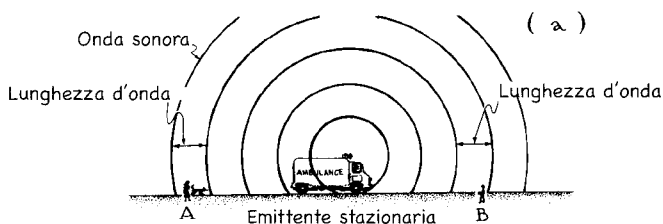
Ampliando il principio della relatività in modo da includere anche la gravità, Einstein compì il primo passo verso un nuovo insieme di leggi gravitazionali, il primo passo dalla relatività *ristretta* alla relatività *generale*.

Siate pazienti, cari lettori. Questo è probabilmente il capitolo più difficile del libro. Il mio racconto diventerà meno tecnico nel prossimo capitolo, quando cominceremo a esplorare i buchi neri.

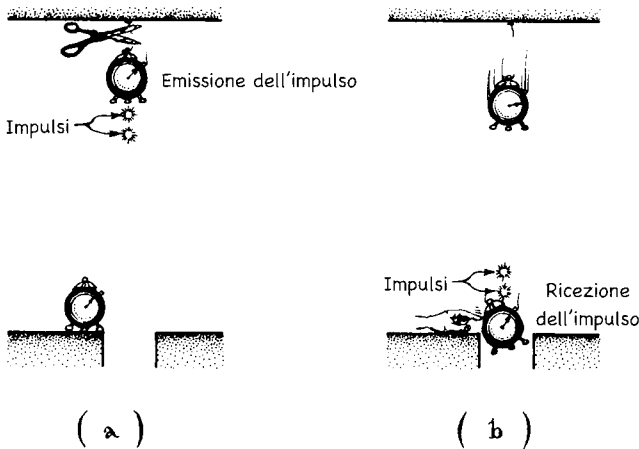
Qualche giorno dopo averlo formulato, Einstein utilizzò il principio di equivalenza per fare una previsione stupefacente, detta *dilatazione gravitazionale del tempo*: *se ci si trova in stato di quiete relativamente a un corpo gravitante, più si è vicini a esso più il nostro tempo deve scorrere lentamente*. Ad esempio, in una stanza sulla Terra il tempo deve scorrere più lentamente vicino al pavimento che vicino al soffitto. Questa differenza a livello terrestre, tuttavia, risulta talmente minuscola (appena 3 parti su 10^{16}, ossia 300 parti su un miliardo di miliardi) che è troppo difficile da individuare. Invece (come vedremo nel prossimo capitolo), vicino a un buco nero la dilatazione gravitazionale del tempo è enorme: se il buco pesa 10 volte il Sole, a 1 centimetro di altezza sopra l'orizzonte del buco il tempo scorrerà 6 milioni di volte più lentamente che lontano da esso, e sull'orizzonte stesso il tempo cesserà del tutto di scorrere (immaginate le possibilità di viaggiare nel tempo: se scendete appena al di sopra dell'orizzonte di un buco nero e restate lì sospesi per un anno, in termini di tempo che scorre in prossimità di esso, e poi tornate sulla Terra, scoprirete che durante quell'anno del vostro tempo lì sono trascorsi milioni di anni!

Einstein scoprì la dilatazione gravitazionale del tempo attraverso un ragionamento piuttosto complicato, ma in seguito ne elaborò una dimostrazione semplice ed elegante, che illustra splendidamente i suoi metodi di ragionamento nella fisica. Tale dimostrazione è riportata nella scheda 2.4, e lo spostamento Doppler della luce su cui essa si basa è illustrato nella scheda 2.3.

Scheda 2.3
LO SPOSTAMENTO DOPPLER

Ogni volta che un'emittente e un ricevitore di onde si muovono l'una verso l'altro, il ricevitore vede le onde spostarsi su una frequenza più alta, ossia un periodo e una lunghezza d'onda più brevi. Se l'emittente e il ricevitore si allontanano, il ricevitore vede le onde spostarsi su frequenze più basse, ossia un periodo e una lunghezza d'onda maggiori. Ciò viene chiamato *spostamento Doppler* ed è una proprietà di tutti i tipi di onde: quelle sonore, quelle dell'acqua, quelle elettromagnetiche e così via.
Per quanto riguarda le onde sonore, lo spostamento Doppler è un fenomeno familiare nella vita comune. Lo si avverte nell'improvviso abbassarsi dell'altezza del suono al passaggio di un'ambulanza a sirene spiegate (illustrazione b), o quando un aeroplano in fase di atterraggio passa sopra di noi. È possibile comprendere lo spostamento Doppler riflettendo sul diagramma seguente.

Ciò che vale per le onde vale anche per le pulsazioni. Se l'emittente trasmette impulsi luminosi (o di altro tipo) a intervalli regolari, il ricevitore, se l'emittente si muove verso di lui, li riceverà con una frequenza maggiore (un intervallo più breve tra un impulso e l'altro) di quella con cui sono stati emessi.

Scheda 2.4
LA DILATAZIONE GRAVITAZIONALE DEL TEMPO

Prendete due orologi identici. Collocatane uno sul pavimento di una stanza accanto a un buco in cui cadrà successivamente e appendete l'altro al soffitto con una corda. Il ticchettio dell'orologio sul pavimento è regolato dallo scorrere del tempo in prossimità del pavimento e quello dell'altro orologio dallo scorrere del tempo in prossimità del soffitto.
Facciamo emettere all'orologio appeso al soffitto, a ogni ticchettio, un brevissimo impulso luminoso diretto verso il basso, verso l'orologio sul pavimento. Immediatamente prima che l'orologio appeso al soffitto emetta il suo primo impulso luminoso, tagliate la corda che lo trattiene e lasciatelo cadere liberamente. Se il tempo che intercorre tra un ticchettio e l'altro è molto breve, nel momento in cui produce quello successivo ed emette il secondo impulso luminoso l'orologio sarà caduto solo impercettibilmente e si troverà ancora quasi in stato di quiete rispetto al soffitto (diagramma a). Ciò significa a sua volta che l'orologio sta ancora avvertendo lo stesso scorrere del tempo avvertito dal soffitto, ossia l'intervallo tra gli impulsi emessi è regolato dal flusso temporale del soffitto.

Immediatamente prima che il primo impulso luminoso raggiunga il pavimento, spingete l'orologio che vi si trova sopra nel buco (diagramma b).

Il secondo impulso arriva così presto che l'orologio del pavimento, nella sua caduta libera, si è mosso impercettibilmente tra i due impulsi ed è ancora praticamente quasi in stato di quiete rispetto al pavimento, e perciò sta ancora avvertendo lo stesso scorrere del tempo avvertito dal pavimento.
In questo modo Einstein convertì il problema di confrontare lo scorrere del tempo avvertito dal soffitto con quello avvertito dal pavimento nel problema di confrontare i ritmi del ticchettio di due orologi in caduta libera: l'orologio in caduta dal soffitto, che avverte il tempo di quest'ultimo, e l'orologio in caduta dal pavimento, che avverte il tempo di quest'ultimo.
Il principio di equivalenza permetteva ora a Einstein di confrontare il ticchettio degli orologi in caduta libera con l'aiuto delle leggi della relatività ristretta.
Dato che l'orologio del soffitto era stato fatto cadere prima di quello del pavimento, la sua velocità verso il basso è sempre maggiore rispetto a quella dell'orologio del pavimento (diagramma b); ossia, esso si muove verso l'orologio del pavimento. Ciò implica che l'orologio del pavimento vedrà gli impulsi luminosi emessi dall'orologio del soffitto con uno spostamento Doppler (scheda 2.3); ossia, li vedrà arrivare a intervalli temporali più brevi di quelli che intercorrono tra i suoi ticchettii. Poiché gli intervalli di tempo tra gli impulsi erano regolati dallo scorrere del tempo in prossimità del soffitto, e gli intervalli di tempo tra i ticchettii dell'orologio sul pavimento sono regolati dallo scorrere del tempo in prossimità del pavimento, ciò significa che il tempo deve scorrere più lentamente vicino al pavimento che non vicino al soffitto; in altre parole, *la gravità deve dilatare lo scorrere del tempo.*

Quando iniziò a scrivere il suo articolo nel 1907, Einstein pensava di descrivere la relatività in un universo senza gravità. Tuttavia, mentre scriveva, aveva scoperto tre elementi utili a risolvere il mistero di come far andare d'accordo la gravità con le sue leggi relativistiche – il principio di equivalenza, la dilatazione gravitazionale del tempo e l'estensione del principio di relatività in modo da includere anche la gravità – e quindi li inserì nel suo articolo. Poi, verso gli inizi di dicembre, lo inviò al redattore dello *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* e si dedicò con tutte le sue forze a elaborare una descrizione completa e relativistica della gravità.

Il 24 dicembre Einstein scrisse a un amico dicendo: «Attualmente sono

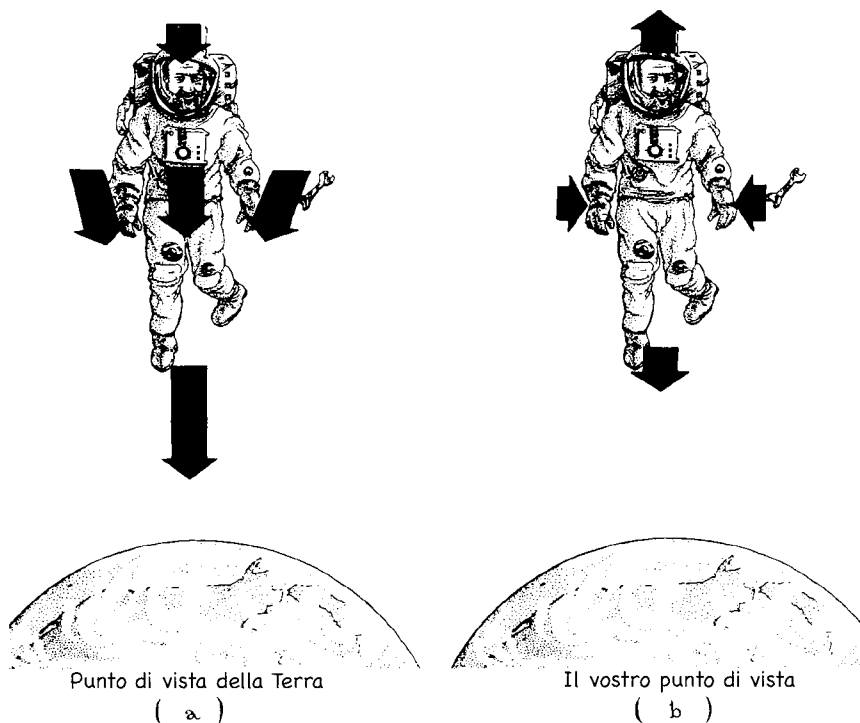
impegnato a riflettere sulla teoria della relatività in connessione con la legge della gravità... Spero di riuscire a chiarire gli spostamenti secolari del perielio di Mercurio rimasti finora inspiegati... ma per ora non sembra funzionare». Agli inizi del 1908, frustrato dall'assenza di reali progressi, si arrese e rivolse la sua attenzione al campo degli atomi, delle molecole e delle radiazioni (il «regno dell'estremamente piccolo»), dove i problemi irrisolti al momento sembravano più abbordabili e interessanti[3]. Durante il 1908 (mentre Minkowski unificava lo spazio e il tempo, e lui derideva quell'unificazione) e durante il 1909, 1910 e 1911, Einstein continuò a occuparsi dell'estremamente piccolo. Quegli anni lo videro anche passare dall'Ufficio brevetti di Berna all'incarico di professore associato presso l'Università di Zurigo e ottenere infine una cattedra a Praga, uno dei centri della vita culturale dell'impero austro-ungarico.

La vita da professore per Einstein non era facile. Trovava irritante dover tenere regolarmente lezioni su argomenti che non riguardavano le sue ricerche. Non riusciva a trovare l'energia per prepararle né l'entusiasmo per renderle affascinanti, malgrado sapesse essere brillante quando faceva lezione su temi che gli stavano a cuore. Ora Einstein era membro a pieno titolo della cerchia accademica europea, ma tutto questo aveva un prezzo. Nonostante ciò, la sua ricerca nel campo dell'estremamente piccolo progrediva in modo impressionante e produceva scoperte che in seguito gli sarebbero valse il premio Nobel (si veda la scheda 4.1).

Poi, a metà del 1911, il fascino che l'estremamente piccolo esercitava su di lui svanì ed Einstein tornò a rivolgere la sua attenzione alla gravità, con la quale avrebbe combattuto a tempo pieno fino alla trionfale formulazione della relatività generale nel novembre del 1915.

Maree gravitazionali e curvatura dello spaziotempo

Immaginate di essere un astronauta che si trova nello spazio molto al di sopra dell'equatore terrestre in caduta libera verso quest'ultimo. Sebbene, mentre cadete, non avvertiate il vostro peso, avvertirete qualche lieve effetto residuo della gravità. Questi residui sono detti «marea gravitazionale» e possono essere compresi pensando alle forze gravitazionali che avvertite, prima dal punto di vista di qualcuno che vi osservi dalla Terra sotto di voi, e poi dal vostro punto di vista.

Vista dalla Terra (figura 2.3a), l'attrazione gravitazionale è leggermente di-

2.3 – Mentre cadete sulla Terra le forze gravitazionali di marea vi tendono dalla testa ai piedi e vi comprimono sui lati.

versa sulle varie parti del corpo. Siccome i vostri piedi sono più vicini alla Terra della vostra testa, la gravità esercita una maggiore attrazione su di essi e in tal modo allunga il vostro corpo dalla testa ai piedi. E siccome la gravità attira sempre verso il centro della Terra, una direzione leggermente orientata a sinistra sul vostro fianco destro e leggermente orientata a destra su quello sinistro, l'attrazione è leggermente orientata a sinistra sulla vostra destra e leggermente a destra sulla vostra sinistra, ossia comprime i vostri lati verso l'interno.

Dal vostro punto di vista (figura 2.3b), l'ampia forza di gravità orientata verso il basso è sparita, svanita. Vi sentite senza peso. Tuttavia, la parte di forza di gravità che è svanita è solo quella che vi attirava verso il basso. L'allungamento dalla testa ai piedi e la compressione lungo i lati permangono. Essi sono provocati dalle differenze tra la gravità esercitata sulle parti esterne

del vostro corpo e quella esercitata sul centro del vostro corpo, differenze dalle quali la caduta libera non può liberarvi.

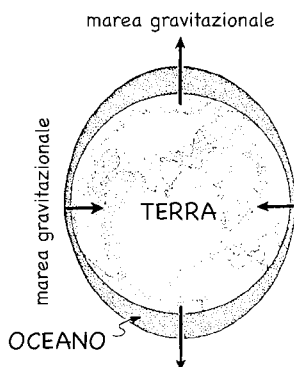
L'allungamento verticale e la compressione laterale che avvertite durante la caduta sono detti marea gravitazionale o forze gravitazionali di marea, perché quando è la Luna anziché la Terra a esserne la causa, ed è la Terra ad avvertirle anziché voi, esse provocano le maree degli oceani (si veda la scheda 2.5).

Nel dedurre il suo principio di equivalenza, Einstein ignorò le forze gravitazionali di marea, come se non fossero esistite (ricordate l'essenza della sua tesi: in caduta libera «non avvertirete il vostro peso» e «vi sembrerà, sotto tutti gli aspetti, che la gravità sia scomparsa nelle vostre vicinanze»). Einstein giustificava l'omissione delle forze di marea in base alla considerazione che voi (e il vostro quadro di riferimento) siete molto piccoli. Ad esempio, se le vostre dimensioni sono quelle di una formica, o ancora più piccole, tutte le parti del vostro corpo saranno molto vicine le une alle altre, e pertanto la direzione e la forza che l'attrazione gravitazionale eserciterà sull'esterno o sul centro del vostro corpo saranno quasi esattamente le stesse, e la *differenza* di gravità tra le parti esterne e il centro del vostro corpo, che provoca l'allungamento e la compressione gravitazionali, sarà estremamente piccola. D'altro canto, se siete un gigante alto 5.000 chilometri, la direzione e la forza che l'attrazione gravitazionale terrestre eserciterà sulle parti esterne del vostro corpo e sul suo centro differiranno notevolmente e, di conseguenza, durante la caduta sperimenterete enormi effetti di tensione e compressione dovuti alle forze di marea.

Questo ragionamento convinse Einstein del fatto che in un quadro di riferimento sufficientemente piccolo e in caduta libera (un quadro molto piccolo rispetto alla distanza oltre la quale l'attrazione gravitazionale cambia) non si dovrebbe essere in grado di individuare alcun effetto dovuto alla marea gravitazionale; ossia quadri di riferimento piccoli e in caduta libera nel nostro Universo dotato di gravità sono equivalenti a quadri inerziali in un universo privo di gravità. Ciò non vale invece per i quadri di grandi dimensioni. E le forze di marea avvertite nei quadri grandi sembravano a Einstein, nel 1911, la chiave per scoprire la natura ultima della gravità.

Il modo in cui la legge gravitazionale di Newton spiegava le maree era chiaro: esse sono prodotte da una differenza di forza e di direzione dell'attrazione gravitazionale tra un luogo e l'altro. La legge di Newton, con la sua forza gravitazionale legata alla distanza doveva essere sbagliata; essa violava il principio della relatività («all'interno di quale quadro bisognava misurare

Scheda 2.5

LE MAREE OCEANICHE PRODOTTE DALLE FORZE DI MAREA

Sul lato della Terra più vicino alla Luna, la gravità lunare è più forte di quella esercitata sul centro della Terra, di conseguenza essa attira gli oceani a sé con maggior forza di quanto non faccia nei confronti della parte solida del pianeta, e gli oceani reagiscono allungandosi un po' verso la Luna. Sul lato più lontano, la gravità lunare è più debole e pertanto attira gli oceani con minor forza rispetto alla parte solida della Terra, ed essi reagiscono allontanandosi dalla Luna. Sul lato sinistro della Terra, l'attrazione gravitazionale, che è diretta verso il centro della Luna, presenta una componente leggermente orientata verso destra, e su quello destro una componente leggermente orientata sinistra, e queste due componenti comprimono gli oceani verso l'interno. Questo schema di allungamento e compressione degli oceani, in combinazione con la rotazione terrestre, dà luogo a due alte maree e a due basse maree ogni giorno. Se le maree sulla vostra spiaggia preferita non si comportano esattamente in questo modo, ciò non dipende dalla gravità della Luna, ma è dovuto a due effetti: 1) l'esistenza di un intervallo di tempo nella reazione dell'acqua alla marea gravitazionale. Occorre del tempo perché l'acqua entri o esca dalle baie, dalle insenature, dai fiumi, dai fiordi e da altre rientranze della costa; 2) il Sole esercita sulla Terra una tensione e una compressione gravitazionali pari per intensità alla metà di quelli lunari, ma orientati in modo diverso perché la posizione del Sole nel cielo (di solito) è diversa da quella della Luna. Le maree terrestri sono il risultato della combinazione della marea gravitazionale del Sole e di quella della Luna.

la distanza?»). La sfida di Einstein consisteva nel formulare una legge gravitazionale completamente nuova, che fosse al tempo stesso compatibile con il principio della relatività e capace di spiegare la marea gravitazionale in un modo nuovo, semplice e convincente.

Dalla metà del 1911 alla metà del 1912 Einstein cercò di spiegare la marea gravitazionale ipotizzando che il tempo fosse deformato, e lo spazio piatto. Questa idea dall'aria radicale era uno sviluppo naturale della dilatazione gravitazionale del tempo: le diverse velocità alle quali scorreva il tempo vicino al soffitto e vicino al pavimento di una stanza sulla Terra potevano essere pensate come una deformazione del tempo. Forse, ipotizzava Einstein, uno schema più complesso di deformazione del tempo avrebbe potuto produrre tutti gli effetti gravitazionali conosciuti, dalla marea gravitazionale alle orbite ellittiche dei pianeti, e perfino all'anomalo slittamento del perielio di Mercurio.

Dopo averla coltivata per dodici mesi, Einstein abbandonò quest'idea, e per una buona ragione. Il tempo è relativo. Il vostro tempo è un misto del mio tempo e del mio spazio (se ci muoviamo l'uno rispetto all'altro), e pertanto se il vostro tempo è deformato ma il vostro spazio è piatto, il mio tempo e il mio spazio devono essere entrambi deformati, come devono esserlo quelli di chiunque altro. Voi e soltanto voi avrete uno spazio piatto, e in tal modo le leggi della fisica devono far emergere il vostro quadro di riferimento come fondamentalmente diverso da tutti gli altri, in contrasto con il principio della relatività.

Ciononostante, la deformazione del tempo «suonava giusta» a Einstein: forse, egli ipotizzava, il tempo di ognuno è deformato e, inevitabilmente, lo è anche lo spazio. Forse, queste deformazioni combinate potevano spiegare la marea gravitazionale.

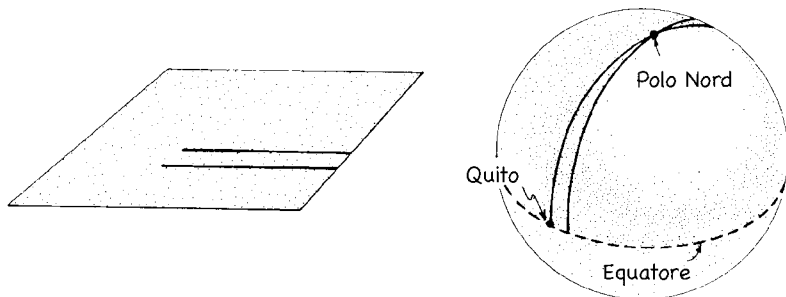
L'idea di una deformazione *sia* del tempo che dello spazio era alquanto audace. Poiché l'Universo ammette un numero infinito di quadri di riferimento diversi, ciascuno dei quali si muove a velocità diversa, doveva esserci un'infinità di tempi deformati e un'infinità di spazi deformati! Fortunatamente, si rese conto Einstein, Hermann Minkowski aveva escogitato un potente strumento per semplificare tale complessità: «D'ora in poi lo spazio in sé e il tempo in sé sono condannati a dissolversi in pure ombre, e solo una specie di unione dei due conserverà un'esistenza indipendente». Vi è un solo, unico, assoluto spaziotempo quadridimensionale nel nostro Universo, e la deformazione del tempo e dello spazio di ognuno deve manifestarsi come *una deformazione del solo, unico, assoluto spaziotempo quadridimensionale di Minkowski*. Questa era la conclusione alla quale Einstein era giunto nell'estate del 1912 (anche se egli preferiva usare il termine «curvatura» invece di «deformazione»). Dopo aver

ridicolizzato per quattro anni l'idea di Minkowski di uno spaziotempo assoluto, Einstein si era finalmente deciso ad abbracciarla, e a deformarla.

Cosa significa per lo spaziotempo essere curvo (o deformato)? Per chiarezza, chiediamoci prima cosa significhi per una superficie bidimensionale essere curva (o deformata). La figura 2.4 mostra una superficie piatta e una curva. Su quella piatta, un comune foglio di carta, sono disegnate due linee assolutamente rette. Esse sono tracciate l'una accanto all'altra, parallele. Euclide, il matematico dell'antica Grecia da cui prende il nome la materia oggi chiamata «geometria euclidea», utilizzava come uno dei suoi postulati geometrici la condizione secondo cui due linee inizialmente parallele come quelle non si incrociano mai. Che esse non si incrocino è una prova inequivocabile del fatto che la superficie su cui le linee sono tracciate è piatta. Se lo spazio è piatto, le linee rette inizialmente parallele non possono mai incrociarsi. Se incontrassimo una coppia di linee rette inizialmente parallele che si incrociano, sapremmo che lo spazio in cui si trovano non è piatto.

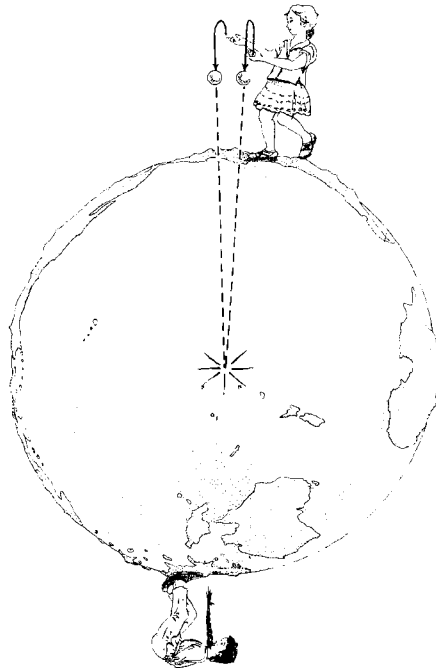
La superficie curva della figura 2.4 è il globo terrestre. Ubicate sul globo la città di Quito, in Ecuador, che si trova sull'equatore. Tracciate una linea esattamente retta da Quito verso nord. La linea procederà verso nord, a longitudine costante, attraversando il Polo.

In che senso essa è una linea retta? In due sensi. Uno è il senso fondamentale per le compagnie aeree: essa è un meridiano, e i meridiani sulla superficie ter-

2.4 – Due linee rette inizialmente parallele non si incrociano mai su una superficie piatta come quella del foglio di carta raffigurato a sinistra. Due linee rette, inizialmente parallele, si incroceranno, tipicamente, su una superficie curva come il globo terrestre raffigurato sulla destra.

restre sono le rotte più brevi tra due punti e pertanto quelle lungo le quali le compagnie aeree preferiscono viaggiare. Costruite un'altra linea qualsiasi che unisca Quito al Polo Nord e sarà necessariamente più lunga del meridiano.

Il secondo senso in cui la linea è retta è quello che useremo di seguito mentre discuteremo dello spaziotempo: in regioni sufficientemente piccole del globo lungo la rotta del meridiano, la curvatura del globo è quasi impercettibile. In una regione del genere, il meridiano sembra una linea retta nel senso che si dà a questa parola quando ci si riferisce a un foglio di carta piatto, il concetto di rettilineo utilizzato dai geometri per tracciare i confini delle proprietà con l'ausilio di tacheometri o raggi laser. Il meridiano è rettilineo, nel senso dei geometri, in ogni regione abbastanza piccola del suo percorso.

I matematici chiamano geodetica ogni linea, su una superficie curva o de-

2.5 – Due palle lanciate in aria lungo traiettorie esattamente parallele, se riescono ad attraversare la Terra, collideranno l'una con l'altra nelle vicinanze del centro del pianeta.

formata, che è retta in questi due sensi: quello della «rotta più breve» delle linee aeree e quello dei geometri.

Ora, sul globo, spostiamoci a est di Quito di pochi centimetri e tracciamo una nuova linea retta (un meridiano, una linea geodetica) esattamente parallela, all'equatore, a quella che passa per Quito. Questa linea retta, come la prima, passerà per il Polo Nord del globo terrestre. *È la curvatura della superficie del globo che obbliga le due linee rette, inizialmente parallele a incrociarsi al Polo Nord.*

Dopo aver osservato gli effetti della curvatura nelle superfici bidimensionali, possiamo tornare allo spaziotempo quadridimensionale e interrogarci sulla curvatura in questo ambito.

In un universo ideale senza gravità non vi è deformazione dello spazio né del tempo; lo spaziotempo non presenta curvature. In un simile universo, secondo le leggi della relatività ristretta di Einstein, le particelle che si muovono liberamente devono viaggiare lungo linee assolutamente rette. Esse devono mantenere una direzione costante e una velocità costante, misurata a partire da qualsiasi quadro di riferimento inerziale. Si tratta di un principio fondamentale della relatività ristretta.

Il principio di equivalenza di Einstein assicura che la gravità non può modificare questo principio fondamentale del moto libero: quando una particella che si muove liberamente nel nostro Universo reale dotato di gravità entra e attraversa un quadro di riferimento piccolo e inerziale (in caduta libera) essa deve muoversi lungo una linea retta attraverso tale quadro. Il moto rettilineo attraverso un quadro piccolo e inerziale, tuttavia, è ovviamente analogo al comportamento delle linee rette misurate dai geometri in una piccola regione della superficie terrestre, e proprio come tale comportamento nelle regioni piccole implica che una linea sia realmente una linea geodetica della superficie terrestre, così anche il moto rettilineo della particella in regioni piccole dello spaziotempo implica che essa si muova lungo una linea geodetica dello spaziotempo. E ciò che vale per questa particella deve valere per tutte le particelle: *ogni particella che si muove liberamente (ogni particella su cui non agisce nessuna forza oltre alla gravità) viaggia lungo una linea geodetica dello spaziotempo.*

Non appena Einstein ebbe compreso ciò gli apparve chiaro che la marea gravitazionale era una manifestazione della curvatura dello spaziotempo.

Per comprenderne il perché, immaginate il seguente esperimento mentale (mio, non di Einstein). State in piedi sulla superficie ghiacciata del Polo Nord e reggete due palline, una per mano (figura 2.5). Lanciatele in aria una accanto

all'altra in modo che salgano verso l'alto lungo traiettorie esattamente parallele e poi osservatele ricadere sulla Terra. In un esperimento mentale come questo potete fare ciò che volete purché non violi i princìpi della fisica. Desiderate osservare le traiettorie delle palline mentre cadono per effetto della gravità non solo al di sopra della superficie terrestre, ma anche al di sotto. A tale scopo, immaginate che le palle siano fatte di un materiale che passi attraverso il suolo e le rocce della Terra senza venirne minimamente rallentato (dei minuscoli buchi neri avrebbero questa proprietà), e potete inoltre immaginare che voi e un vostro amico che si trova dalla parte opposta della Terra, e che a sua volta sta guardando, possiate seguire il moto delle palline dentro la Terra grazie alla «vista a raggi X».

Quando le palline entrano nella Terra, la marea gravitazionale di quest'ultima le comprime assieme nello stesso modo in cui comprime i vostri fianchi se siete un astronauta in caduta libera (figura 2.3). La forza della marea gravitazionale è tale da far sì che entrambe le palline cadano quasi esattamente verso il centro della Terra e si scontrino in quel punto.

Ora arriviamo alla conclusione di questo esperimento mentale: ogni pallina si muoveva esattamente lungo una linea retta (geodetica) attraverso lo spaziotempo. Inizialmente le due linee rette erano parallele. Poi si sono incrociate (hanno colliso). L'incrociarsi di linee rette inizialmente parallele segnala una curvatura dello spaziotempo. Dal punto di vista di Einstein la curvatura dello spaziotempo *provoca* l'incrocio, ossia provoca la collisione delle palline, proprio come la curvatura del globo faceva incrociare le linee rette nella figura 2.4. Dal punto di vista di Newton, è la marea gravitazionale a causare l'incrocio.

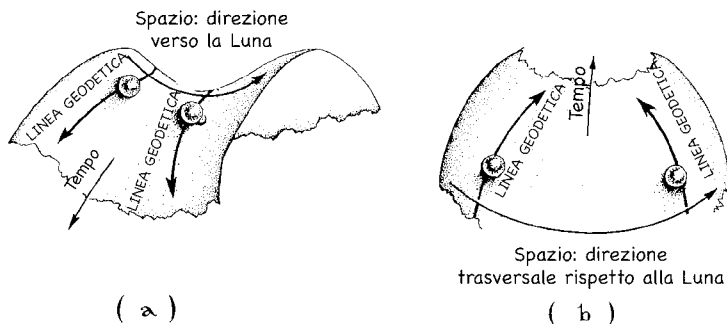
Perciò, Einstein e Newton, con i loro punti di vista molto diversi sulla natura dello spazio e del tempo, danno nomi molto diversi al fattore che provoca questo incrocio. Einstein lo chiama curvatura dello spaziotempo; Newton lo chiama marea gravitazionale. Ma il fattore che agisce è uno solo. Pertanto, *la curvatura dello spaziotempo e la marea gravitazionale devono essere esattamente la stessa cosa, espressa in due linguaggi diversi.*

La mente umana ha molta difficoltà a visualizzare superfici curve con più di due dimensioni; perciò è quasi impossibile visualizzare la curvatura dello spaziotempo quadridimensionale. Tuttavia possiamo comprenderla un po' meglio esaminando diverse porzioni bidimensionali dello spaziotempo. La figura 2.6 usa due di tali porzioni per spiegare in che modo la curvatura dello spaziotempo crei l'allungamento e la compressione che producono le maree dell'oceano.

La figura 2.6a raffigura una porzione di spaziotempo in prossimità della Terra, una porzione che include il tempo più lo spazio in direzione della Luna.

La Luna curva questa porzione dello spaziotempo e la curvatura allunga due linee geodetiche divaricandole nel modo indicato. In maniera corrispondente, noi esseri umani vediamo due particelle che si muovono liberamente lungo le linee geodetiche divaricarsi durante il tragitto e interpretiamo il fenomeno come una forza di marea gravitazionale. Questa forza di marea che causa l'allungamento (la curvatura dello spaziotempo) non agisce solo sulle particelle che si muovono liberamente ma anche sugli oceani terrestri, e li fa allungare nel modo indicato nella scheda 2.5, dando luogo a rigonfiamenti degli oceani sui lati della Terra più vicino e più lontano rispetto alla Luna. I due rigonfiamenti cercano di viaggiare lungo linee geodetiche dello spaziotempo curvo (figura 2.6a) e pertanto tendono a separarsi, ma la gravità terrestre (la curvatura dello spaziotempo provocata dalla Terra e non indicata nella figura) controbilancia questa spinta, cosicché l'oceano si limita a rigonfiarsi.

La figura 2.6b rappresenta una porzione diversa dello spaziotempo in prossimità della Terra, che comprende il tempo più lo spazio in direzione trasversale rispetto a quella della Luna. La Luna curva questa porzione dello spaziotempo e la curvatura comprime assieme le linee geodetiche nel modo indicato. In maniera corrispondente, noi esseri umani vediamo due particelle che si muovono liberamente lungo linee geodetiche trasversali rispetto alla direzione della Luna venire compresse l'una contro l'altra dalla curvatura (dalla marea gravitazionale della Luna), e analogamente vediamo gli oceani

2.6 – Due porzioni bidimensionali di spaziotempo curvo, in prossimità della Terra. La curvatura, provocata dalla Luna, crea un allungamento gravitazionale in direzione della Luna (a) e una compressione gravitazionale lungo la direzione trasversale rispetto a quella della Luna (b); l'allungamento e la compressione danno luogo alle maree degli oceani nel modo illustrato nella precedente scheda 2.5.

terrestri venire compressi lungo direzioni trasversali rispetto a quella della Luna. Questa compressione gravitazionale provoca la compressione trasversale degli oceani indicata nella scheda 2.5.

Einstein era professore a Praga nell'estate del 1912 quando si rese conto che la marea gravitazionale e la curvatura dello spaziotempo erano la stessa cosa. Era una rivelazione meravigliosa, anche se non ne era ancora certo e non la comprendeva in modo così chiaro e completo come l'ho descritta, e anche se non offriva una spiegazione completa della gravità. Essa diceva a Einstein che la curvatura dello spaziotempo dirige il moto delle particelle libere e causa le maree dell'oceano, ma non gli diceva in che modo si produce la curvatura. Einstein riteneva che la materia all'interno del Sole, della Terra e degli altri pianeti fosse in qualche modo responsabile della curvatura. Ma come? *In che modo la materia deforma lo spaziotempo, e quali sono i particolari di questa deformazione?* La ricerca di una *legge di deformazione* divenne la principale preoccupazione di Einstein.

Poche settimane dopo aver scoperto la curvatura dello spaziotempo, Einstein lasciò Praga per tornare a Zurigo e occupare una cattedra presso la sua università, l'ETH. Al suo arrivo a Zurigo nell'agosto del 1912, Einstein chiese consiglio a un vecchio compagno di studi, Marcel Grossmann, divenuto professore di matematica nella stessa sede. Einstein gli spiegò la sua idea che la marea gravitazionale e la curvatura dello spaziotempo fossero la stessa cosa e gli chiese se qualche matematico avesse sviluppato una serie di equazioni che potesse aiutarlo a elaborare una legge di deformazione, ossia la legge che descrive in che modo la materia obblighi lo spaziotempo a curvarsi. Grossmann, la cui specializzazione riguardava altri aspetti della geometria, non era sicuro, ma dopo aver frugato in biblioteca tornò con una risposta: sì, le equazioni necessarie esistevano. Erano state elaborate in gran parte dal matematico tedesco Bernhard Riemann negli anni Sessanta del XIX secolo, dall'italiano Gregorio Ricci negli anni Ottanta dello stesso secolo e dall'allievo di Ricci, Tullio Levi-Civita nell'ultimo decennio del XIX e nel primo decennio del XX secolo. Esse portavano il nome di «calcolo differenziale assoluto» (o, nel linguaggio dei fisici del periodo 1915-1960, «analisi tensoriale», o ancora, nel linguaggio successivo al 1960 «geometria differenziale»). Ma, disse Grossmann a Einstein, la geometria differenziale è un pasticcio terribile in cui i fisici non dovrebbero immischiarsi. Esistevano altre geometrie che avrebbero potuto essere utilizzate per elaborare la legge di deformazione? No.

Così, con molto aiuto da parte di Grossmann, Einstein si accinse a dipanare

i garbugli della geometria differenziale. Mentre Grossmann insegnava la matematica a Einstein, questi insegnava un po' di fisica a Grossmann. Einstein riportò in seguito le seguenti parole di Grossmann: «Ammetto di aver acquisito, dopotutto, qualcosa di importante dallo studio della fisica. Prima, quando sedevo su una sedia e avvertivo una traccia del calore lasciato da chi mi aveva preceduto, ero solito rabbrividire leggermente. Ora è tutto finito, perché al riguardo la fisica mi ha insegnato che il calore è una cosa del tutto impersonale».

Imparare la geometria differenziale non era un compito facile per Einstein. Lo spirito della materia era estraneo alle argomentazioni intuitive di fisica che trovava tanto naturali. Nell'ottobre del 1912 scrisse a Arnold Sommerfeld, un eminente fisico tedesco: «Mi sto occupando esclusivamente del problema della gravitazione e ritengo che, con l'aiuto di un matematico del posto [Grossmann] che è mio amico, riuscirò a superare tutte le difficoltà. Ma una cosa è certa, che in vita mia non ho mai lavorato così duramente e che ho acquisito un grande rispetto per la matematica, le cui sottigliezze, nella mia ingenuità, avevo finora ritenuto del tutto superflue! Rispetto a questo problema la teoria della relatività originaria [la relatività ristretta] è un gioco da ragazzi».

Insieme, Einstein e Grossmann si confrontarono per tutto l'autunno e l'inverno con l'enigma di come la materia obbligasse lo spaziotempo a curvarsi. Ma malgrado tutti i loro sforzi, non si riusciva a mettere d'accordo la matematica con la visione di Einstein. La legge di deformazione sfuggiva loro.

Einstein era convinto che la legge di deformazione dovesse obbedire a una versione generalizzata (allargata) del principio della relatività: doveva apparire la stessa in ogni quadro di riferimento – non solo quelli inerziali (in caduta libera), ma anche quelli non inerziali. La legge di deformazione non doveva dipendere per la sua formulazione da nessun quadro di riferimento speciale o da nessuna categoria speciale di quadri di riferimento[4]. Purtroppo, le equazioni della geometria differenziale non sembravano ammettere una simile legge. Alla fine, al termine dell'inverno, Einstein e Grossmann abbandonarono la ricerca e pubblicarono la miglior legge di deformazione che riuscirono a scoprire – una legge che dipendeva per la sua definizione da una categoria speciale di quadri di riferimento.

Einstein, eterno ottimista, cercava di convincersi che in fondo non era una catastrofe. Al fisico Paul Ehrenfest, suo amico, scrisse all'inizio del 1913: «Cosa può esserci di più bello del fatto che questa necessaria specializzazione deriva da [le equazioni matematiche sulla conservazione dell'energia e del momento]». Ma dopo averci riflettuto ulteriormente cominciò a considerarlo un disastro. Ad agosto del 1913 scrisse a Lorentz: «La mia fiducia

nell'affidabilità della teoria [la "legge di deformazione"] oscilla ancora... [poiché non obbedisce al principio generale della relatività], la teoria contraddice il suo punto di partenza e tutto è campato in aria».

Mentre Einstein e Grossman annaspavano intorno alla curvatura dello spaziotempo, altri fisici sparsi per l'Europa raccolsero la sfida cercando di unificare le leggi della gravità e la relatività speciale. Ma nessuno di loro – Gunnar Nordström a Helsinki, in Finlandia; Gustav Mie a Greifswald, in Germania; Max Abraham a Milano, in Italia – adottò il punto di vista di Einstein della curvatura dello spaziotempo. Essi trattavano la gravità come l'elettromagnetismo, come dovuta a un campo di forza presente nello spaziotempo piatto e soggetto alla relatività speciale di Minkowski. Non c'era da stupirsi che avessero scelto questo approccio: la matematica usata da Einstein e Grossmann era terribilmente complessa, e aveva prodotto una legge di deformazione che contraddiceva le prescrizioni dei suoi stessi autori.

La polemica tra i sostenitori delle varie tesi infuriava. Abraham scrisse: «Coloro che, come chi scrive, hanno messo ripetutamente in guardia contro il canto delle sirene [del principio della relatività] saluteranno con soddisfazione il fatto che il suo inventore si sia ora convinto della sua infondatezza». Einstein replicò: «A mio parere la situazione non indica il fallimento del principio della relatività... Non vi è la minima ragione per dubitare della sua validità». E in privato descrisse la teoria della gravità di Abraham come «un magnifico cavallo cui mancano tre zampe». Scrivendo ad amici nel 1913 e nel 1914, Einstein disse a proposito della controversia: «Sono contento che almeno la questione venga presa con la dovuta vivacità. Amo le controversie. Come Figaro, il chitarrino le suonerò». «Sono contento che i colleghi si occupino della teoria [elaborata da me e Grossmann], anche se al momento solo allo scopo di distruggerla... In apparenza la teoria di Nordström... è molto più plausibile. Ma anch'essa è costruita sullo [spaziotempo piatto minkowskiano], la fiducia nel quale, a mio parere, si fonda su qualcosa di simile alla superstizione».

Nell'aprile del 1914 Einstein lasciò l'EHT per una cattedra a Berlino che non prevedeva attività di insegnamento. Finalmente poteva dedicarsi alla ricerca quanto voleva e perfino nella stimolante vicinanza dei più grandi fisici di Berlino, Max Planck e Walther Nernst. A Berlino, malgrado lo scoppio della Prima Guerra Mondiale nel giugno 1914, Einstein portò avanti la sua ricerca di una descrizione accettabile di come la materia curvi lo spaziotempo, una descrizione che non fosse basata su nessun tipo speciale di quadri riferimento, una legge di deformazione perfezionata.

A tre ore di treno da Berlino, nella cittadina universitaria di Göttingen dove aveva lavorato Minkowski, viveva uno dei più grandi matematici di tutti i tempi: David Hilbert.

Hilbert nutriva un appassionato interesse per la fisica. Le idee di Einstein, che erano state pubblicate, lo affascinavano, e così alla fine di giugno del 1915 lo invitò a fargli visita. Einstein si trattenne circa una settimana e tenne sei lezioni di due ore per Hilbert e i suoi colleghi. Diversi giorni dopo la visita, Einstein scrisse a un amico: «Ho avuto la grande gioia di vedere che a Göttingen comprendono tutto [del mio lavoro] fin negli ultimi dettagli. Di Hilbert sono semplicemente incantato».

Qualche mese dopo il suo rientro a Berlino, cominciò a essere più angustiato che mai dalla legge di deformazione di Einstein-Grossmann. Non solo non rispettava la sua visione secondo cui le leggi della gravità dovevano essere le stesse in tutti i quadri di riferimento, ma, come scoprì dopo difficoltosi calcoli, forniva un valore erroneo per lo slittamento anomalo del perielio dell'orbita di Mercurio. Egli aveva sperato che la sua teoria spiegasse lo slittamento del perielio e risolvesse quindi in modo trionfale la discrepanza di tale slittamento rispetto alle leggi di Newton. Un simile risultato avrebbe fornito perlomeno qualche conferma sperimentale del fatto che le sue leggi di gravità erano giuste e quelle di Newton sbagliate. Tuttavia, i suoi calcoli, effettuati in base alla legge di deformazione di Einstein-Grossmann, davano uno slittamento del perielio pari alla metà di quello osservato.

Gettandosi di nuovo sui vecchi calcoli insieme a Grossmann, Einstein scoprì qualche errore cruciale. Lavorò febbrilmente per tutto il mese di ottobre e il 4 novembre presentò alla sessione plenaria settimanale dell'Accademia prussiana delle Scienze a Berlino una relazione sugli errori e una versione modificata della legge di deformazione – ancora basata in parte su una classe speciale di quadri di riferimento, ma meno di prima.

Ancora insoddisfatto, Einstein si arrovellò per tutta la settimana seguente sulla sua legge del 4 novembre, trovò altri errori, e presentò ancora un'altra proposta relativa alla legge di deformazione alla riunione dell'Accademia dell'11 novembre. Ma essa continuava a basarsi su quadri speciali e continuava pertanto a violare il principio della relatività.

Rassegnato a questa violazione, Einstein si impegnò nella settimana successiva a calcolare le conseguenze della sua nuova legge che potevano essere osservate per mezzo dei telescopi. Dal suo punto di vista, essa prediceva che la luce stellare che oltrepassava il lembo del Sole subisse una deflessione gravitazionale pari a un angolo di 1,7 arcosecondi (una previsione che sarebbe

stata confermata da calcoli accurati quattro anni più tardi durante un'eclissi solare). Ancor più importante per Einstein, la nuova legge forniva lo slittamento corretto del perielio di Mercurio! Egli era fuori di sé dalla gioia; per tre giorni rimase in un tale stato di eccitazione che non riuscì a lavorare. Presentò questo risultato trionfale alla successiva riunione dell'Accademia il 18 novembre.

Ma il fatto che la sua legge violasse il principio della relatività non lo lasciava tranquillo. Così, la settimana seguente, Einstein riesaminò di nuovo i suoi calcoli e trovò un altro errore, quello cruciale. Alla fine, tutto andò al posto giusto. L'intera formalizzazione matematica era ora libera da ogni dipendenza da quadri di riferimento speciali: assumeva la stessa forma quando veniva espressa in ogni possibile quadro di riferimento (si veda la scheda 2.6), e pertanto obbediva al principio della relatività. L'intuizione di Einstein del 1914 era stata pienamente confermata! E la nuova formalizzazione forniva ancora le stesse previsioni sullo slittamento del perielio di Mercurio e sulla deflessione gravitazionale della luce, accogliendo anche la previsione formulata nel 1907 della dilatazione gravitazionale del tempo. Einstein espose queste conclusioni e la forma definitiva della sua legge *relativistica generale* della deformazione all'Accademia prussiana il 25 novembre.

Tre giorni dopo Einstein scrisse al suo amico Arnold Sommerfeld: «Il mese scorso è stato il periodo più eccitante e arduo della mia vita, ma anche uno dei più proficui». Poi, a gennaio, in una lettera a Paul Ehrenfest: «Immagina la mia gioia [per il fatto che la mia nuova legge di deformazione rispetti il principio della relatività generale] e [preveda] correttamente il moto del perielio di Mercurio. Sono stato fuori di me per l'estasi durante giorni interi». E successivamente, parlando dello stesso periodo: «Solo chi li ha vissuti sa cosa vogliano dire gli anni passati a brancolare nel buio alla ricerca di una verità che si avverte ma non si può esprimere, l'intenso desiderio e l'alternarsi di fiducia e timore fino ad arrivare alla chiarezza e alla comprensione».

È interessante osservare che Einstein non è stato il primo a scoprire la forma corretta della legge di deformazione, la forma che rispetta il principio della relatività. L'onore di essere stato il primo a scoprirla va concesso a Hilbert. Nell'autunno del 1915, anche se Einstein si stava faticosamente aprendo il cammino verso la legge corretta, commettendo un errore matematico dietro l'altro, Hilbert rimuginava su quanto aveva appreso durante la visita estiva di Einstein a Göttingen. Durante una vacanza estiva sull'isola di Rugen, nel Baltico, gli venne l'idea risolutrice, e in poche settimane riuscì a formulare

la legge giusta – ottenuta non grazie all'arduo cammino per tentativi ed errori di Einstein, ma attraverso un succinto ed elegante percorso matematico. Hilbert presentò la sua deduzione e la legge che ne risultava in una riunione dell'Accademia reale delle Scienze a Göttingen il 20 novembre 1915, appena cinque giorni prima che Einstein presentasse la stessa legge nella riunione dell'Accademia prussiana a Berlino.

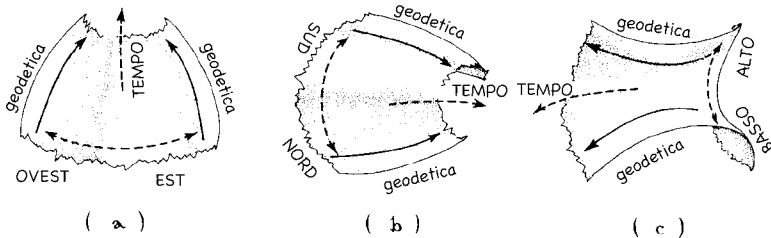
In modo del tutto naturale, e d'accordo con Hilbert, alla legge di deformazione che era stata scoperta venne dato il nome di *Equazione di campo di Einstein* (scheda 2.6), anziché intitolarla a Hilbert. Hilbert aveva compiuto gli ultimi passi matematici verso la sua scoperta in maniera indipendente e quasi simultanea rispetto a Einstein, ma a quest'ultimo si doveva praticamente tutto ciò che li aveva preceduti: aver compreso che la marea gravitazionale doveva essere la stessa cosa della deformazione dello spaziotempo, l'idea che la legge di deformazione debba rispettare il principio della relatività, e il 90% iniziale di tale legge, l'equazione di campo di Einstein. In effetti, senza Einstein, le leggi relativistiche generali della gravità avrebbero potuto non venire scoperte ancora per molti decenni.

Mentre frugo tra gli articoli scientifici pubblicati da Einstein (ricerca che purtroppo devo condurre sull'edizione russa del 1965 delle sue opere complete perché non so il tedesco e nel 1993 la maggior parte dei suoi articoli non è ancora stata tradotta in inglese!), sono colpito dal profondo cambiamento che avviene nella natura dei suoi lavori nel 1912. Prima di quella data i suoi articoli sono fantastici per la loro eleganza, la loro profonda intuizione e il modesto ricorso alla matematica. Molti argomenti sono gli stessi che io e i miei amici usiamo negli anni Novanta quando teniamo le nostre lezioni sulla relatività. Nessuno è riuscito a trovarne di migliori. Invece, dopo il 1912, la matematica complessa abbonda negli articoli di Einstein, anche se di solito in combinazione con intuizioni riguardanti le leggi della fisica. Proprio questa capacità di combinare matematica e intuizione nel campo della fisica, che solo egli possedeva tra tutti i fisici che si occupavano della gravità nel periodo tra il 1912 e il 1915, consentì infine a Einstein di arrivare alla formulazione completa delle sue leggi gravitazionali.

Ma Einstein maneggiava i suoi strumenti matematici in maniera un po' maldestra. Come avrebbe detto in seguito Hilbert, «qualsiasi ragazzo che si incontra per le strade di Göttingen capisce più di Einstein la geometria quadridimensionale. Ma nonostante ciò, è stato Einstein a compiere l'opera [a formulare la legge relativistica generale della gravità] e non i matematici».

Scheda 2.6

L'EQUAZIONE DI CAMPO DI EINSTEIN: LA LEGGE DI DEFORMAZIONE DELLO SPAZIOTEMPO DI EINSTEIN

La legge della deformazione dello spaziotempo, o equazione di campo di Einstein, afferma che «la massa e la pressione deformano lo spaziotempo». Più specificamente: si scelga un quadro di riferimento arbitrario in un punto qualsiasi dello spaziotempo. In tale quadro di riferimento si esplori la curvatura dello spaziotempo studiando il mondo in cui la curvatura (ossia la marea gravitazionale) comprime tra loro le particelle che si muovono liberamente oppure le fa allontanare lungo ognuna delle tre direzioni spaziali del quadro prescelto: est-ovest, nord-sud e alto-basso. Le particelle si muovono lungo linee geodetiche dello spaziotempo (figura 2.6), e la velocità alla quale vengono attratte tra loro o allontanate è proporzionale alla forza della curvatura lungo la traiettoria tra esse. Se vengono attratte come nei diagrammi (a) e (b) si dice che la curvatura è positiva; se vengono allontanate come in (c), la curvatura è negativa.

Si aggiungano le forze della curvatura lungo tutte e tre le direzioni est-ovest [diagramma (a)], nord-sud [diagramma (b)] e alto-basso [diagramma (c)]. L'equazione di campo di Einstein afferma che: *la somma delle forze di queste tre curvature è proporzionale alla densità della massa in prossimità della particella (moltiplicata per la velocità della luce al quadrato per convertirla in densità di energia;* si veda la scheda 5.2*) più tre volte la pressione della materia in prossimità delle particelle.*

Anche se voi e io ci trovassimo nella stessa ubicazione nello spaziotempo (ad esempio, in volo sopra Parigi a mezzogiorno del 14 luglio 1996), se ci muoviamo relativamente l'uno rispetto all'altro, il vostro spazio sarà diverso

dal mio e analogamente la densità della massa (ad esempio, la massa dell'aria attorno a noi) che misurerete sarà diversa da quella che misurerò io, e le misurazioni della pressione della materia (ad esempio, la pressione dell'aria) che effettueremo saranno diverse.
Analogamente, risulta che la somma delle tre curvature dello spaziotempo misurata da voi sarà diversa dalla somma che misurerò io. Tuttavia, una volta effettuate le misurazioni, a ognuno di noi la somma delle curvature deve risultare proporzionale alla densità della massa più tre volte la pressione. In questo senso, l'equazione di campo di Einstein è la stessa in ogni quadro di riferimento, e rispetta il principio della relatività.
Nella maggior parte delle circostanze (ad esempio, in tutto il Sistema Solare), la pressione della materia è esigua rispetto alla densità della sua massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce, pertanto la pressione contribuisce in misura irrilevante alla curvatura dello spaziotempo; *la deformazione dello spaziotempo è dovuta quasi unicamente alla massa*. Solo nelle profondità delle stelle di neutroni (capitolo V) e in pochi altri luoghi esotici, la pressione contribuisce significativamente alla deformazione.
Elaborando matematicamente l'equazione di campo, Einstein e altri fisici non solo hanno spiegato la deflessione della luce stellare da parte del Sole e il moto dei pianeti lungo le rispettive orbite, compreso il misterioso slittamento del perielio di Mercurio, ma hanno anche previsto l'esistenza dei buchi neri (capitolo III), le onde gravitazionali (capitolo X) le singolarità dello spaziotempo (capitolo XIII) e forse l'esistenza di cunicoli temporali e delle macchine del tempo (capitolo XIV). Il resto di questo libro è dedicato a questa eredità lasciataci dal genio di Einstein.

Fu lui a compiere l'opera perché non bastava la matematica, occorreva anche l'intuizione unica di Einstein nel campo della fisica.

In realtà Hilbert esagerava. Einstein era un discreto matematico, anche se nelle tecniche matematiche egli non eccelleva quanto nell'intuizione in campo fisico. Di conseguenza, pochi tra gli argomenti elaborati da Einstein dopo il 1912 vengono oggi ancora illustrati nel modo da lui adoperato. Sono stati fatti miglioramenti. E poiché la ricerca volta a comprendere le leggi della fisica dopo il 1915 si è sempre più rivolta alla matematica, Einstein diventò progressivamente una figura meno di spicco. Altri raccolsero la fiaccola.

III. LA SCOPERTA E IL RIFIUTO DEI BUCHI NERI

Dove le leggi della deformazione dello spaziotempo di Einstein predicono l'esistenza dei buchi neri e Einstein respinge tale previsione

«Il risultato essenziale di questa ricerca», scriveva Einstein in un articolo tecnico del 1939, «è la chiara comprensione del perché le "singolarità di Schwarzschild" non esistano nella realtà fisica». Con queste parole, Einstein rendeva manifesto e inequivocabile il suo rifiuto della sua stessa eredità intellettuale: i buchi neri che le sue leggi relativistiche generali della gravità sembravano prevedere.

Solo alcune caratteristiche dei buchi neri erano state all'epoca dedotte dalle leggi di Einstein, e l'espressione «buchi neri» non era ancora stata coniata; essi venivano chiamati «singolarità di Schwarzschild». Tuttavia, era chiaro che qualsiasi cosa cadesse in un buco nero non avrebbe più potuto uscirne né emettere luce o altro all'esterno, e ciò era sufficiente per convincere Einstein e la maggior parte dei fisici dell'epoca che i buchi neri erano degli oggetti ridicolmente bizzarri che certamente non esistevano nell'Universo reale. In qualche modo, le leggi della fisica dovevano proteggere l'Universo da simili mostri.

Cosa si sapeva sui buchi neri nell'epoca in cui Einstein ne rifiutava così decisamente l'esistenza? Quanto era fondata la previsione della loro esistenza da parte della relatività generale? Come poteva Einstein rifiutare tale previsione e continuare a credere nella legge della relatività generale? Le risposte a queste domande hanno le loro radici nel XVIII secolo.

Durante il Settecento, gli scienziati (allora chiamati filosofi naturali) credevano che la gravità fosse governata dalle leggi di Newton e che la luce fosse fatta di corpuscoli (particelle) che venivano emessi dalle loro fonti a

una velocità molto elevata e universale. Tale velocità si sapeva pari all'incirca a 300.000 chilometri al secondo, grazie alle misurazioni telescopiche della luce proveniente dalle lune di Giove quando orbitano attorno al pianeta madre.

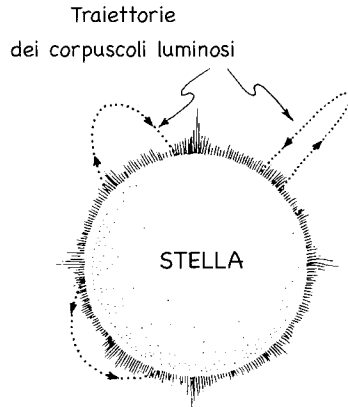
Nel 1783 John Michell, filosofo naturale inglese, osò combinare la descrizione corpuscolare della luce con le leggi gravitazionali di Newton e prevedere, di conseguenza, l'aspetto delle stelle molto compatte. Lo fece attraverso un esperimento mentale che ripropongo qui di seguito in forma modificata.

Lanciate una particella dalla superficie di una stella con una certa velocità iniziale e lasciatela muovere liberamente verso l'alto. Se la velocità iniziale è troppo bassa, la gravità della stella rallenterà la particella fino ad arrestarla e poi attirarla di nuovo verso la superficie. Se la velocità iniziale è abbastanza elevata la gravità rallenterà la particella, ma non la fermerà; la particella riuscirà a sfuggire. La linea divisoria, la velocità iniziale minima per sfuggire, viene chiamata «velocità di fuga». Per una particella lanciata dalla superficie della Terra la velocità di fuga è 11 chilometri al secondo, per una particella emessa dalla superficie del Sole è 617 chilometri al secondo, ossia lo 0,2% della velocità della luce.

Michell riuscì a calcolare la velocità di fuga usando la legge di gravità di Newton e poté dimostrare che era proporzionale alla radice quadrata della massa della stella divisa per la sua circonferenza. Pertanto, data la massa di una stella, più la sua circonferenza è piccola, maggiore è la velocità di fuga. La ragione è semplice: più la circonferenza della stella è piccola, più la sua superficie è vicina al centro e, di conseguenza, più forte è la gravità che vi viene esercitata, e più difficile è per la particella sfuggire all'attrazione gravitazionale della stella.

Esiste una *circonferenza critica*, rifletté Michell, per la quale la velocità di fuga è quella della luce. Se i corpuscoli luminosi sono soggetti alla gravità allo stesso modo degli altri tipi di particelle, la luce riesce appena a sfuggire da una stella dotata di tale circonferenza critica. Da una stella un po' più piccola, non può sfuggire affatto. Un corpuscolo luminoso emesso da una stella di questo tipo alla velocità standard della luce pari a 299.792 chilometri al secondo, al principio volerà verso l'alto, poi rallenterà fino ad arrestarsi e ricadrà sulla superficie della stella; si veda la figura 3.1.

Michell non ebbe difficoltà a calcolare la circonferenza critica; era pari a 18,5 chilometri se la stella aveva la stessa massa del Sole, e proporzionalmente più grande se la massa era superiore.

Nulla nelle leggi della fisica del XVIII secolo impediva l'esistenza di una

3.1 – Il comportamento della luce emessa da una stella con una circonferenza inferiore a quella critica, calcolato nel 1783 da John Michell utilizzando la legge di gravità di Newton e la descrizione corpuscolare della luce.

stella del genere. Pertanto, Michell ipotizzò che l'Universo contenesse un vasto numero di queste stelle scure, ognuna delle quali viveva beata all'interno della sua circonferenza critica, ognuna invisibile dalla Terra perché i corpuscoli luminosi emessi dalla sua superficie venivano inesorabilmente trascinati indietro. Queste *stelle scure* erano la versione settecentesca dei buchi neri.

Michell, che fu rettore di Thornhill, nello Yorkshire, in Inghilterra, il 27 novembre del 1783 comunicò alla Royal Society di Londra la sua tesi sulla possibile esistenza delle stelle scure. La sua relazione fece un buco nell'acqua tra i filosofi naturali inglesi. Tredici anni dopo, il filosofo naturale francese Pierre Simon Laplace rese popolare quella tesi nella prima edizione della sua famosa opera *L'esposizione del sistema del mondo*, senza citare il precedente lavoro di Michell. Laplace ribadì la tesi dell'esistenza delle stelle scure nella seconda edizione (del 1799), ma all'epoca della terza edizione (1808), la scoperta dell'interferenza della luce con se stessa[1] da parte di Thomas Young stava spingendo i filosofi naturali ad abbandonare la concezione corpuscolare della luce e ad abbracciare quella che la interpretava come onda, elaborata da Christiaan Huygens; e non era affatto chiaro come la concezione della luce in quanto onda potesse essere resa compatibile con la legge di

gravità di Newton in modo da calcolare l'effetto della gravità di una stella sulla luce che essa emetteva. Per questa ragione, probabilmente, Laplace eliminò il concetto di stella scura dalla terza edizione del suo libro e da quelle successive.

Solo nel novembre del 1915, dopo che Einstein ebbe formulato le leggi di gravità in base alla relatività generale, i fisici ricominciarono a pensare di saperne abbastanza sulla gravitazione e la luce da calcolare l'effetto della gravità di una stella sulla luce da essa emessa. Solo allora poterono riesaminare con fiducia le stelle scure (buchi neri) di Michell e Laplace.

Fu Karl Schwarzschild, uno dei più rinomati astrofisici degli inizi del XX secolo, a fare il primo passo. Schwarzschild, che all'epoca, durante la Prima Guerra Mondiale, prestava servizio nell'esercito tedesco sul fronte russo, lesse la formulazione della relatività generale di Einstein nel numero del 25 novembre 1915 degli Atti dell'Accademia prussiana delle Scienze. Quasi immediatamente cercò di scoprire quali previsioni poteva fare sulle stelle la nuova legge gravitazionale di Einstein.

Poiché sarebbe molto complicato, dal punto di visto matematico, analizzare una stella che ruota o che non è sferica, Schwarzschild si limitò alle stelle che non ruotano affatto e che sono perfettamente sferiche, e per facilitare i calcoli cercò per prima cosa la descrizione matematica della parte esterna di una stella, rimandando quella dell'interno a un momento successivo. In pochi giorni trovò la risposta. A partire dall'equazione di campo di Einstein egli aveva calcolato, nei minimi dettagli, la curvatura dello spaziotempo all'esterno di *qualsiasi* stella sferica non ruotante. I suoi calcoli erano eleganti e armoniosi e la geometria dello spaziotempo curvo che prevedeva, la *geometria di Schwarzschild*, nome con il quale divenne presto famosa, era destinata a esercitare un enorme impatto sulla nostra visione della gravità e dell'Universo.

Schwarzschild inviò a Einstein un articolo in cui descriveva i suoi calcoli e Einstein lo presentò in suo nome a Berlino alla riunione dell'Accademia prussiana delle Scienze il 13 gennaio 1916. Diverse settimane dopo, Einstein presentò all'Accademia un secondo articolo di Schwarzschild: il calcolo esatto della curvatura dello spaziotempo *all'interno* della stella. Solo quattro mesi dopo, la notevole produttività di Schwarzschild ebbe fine: il 19 giugno a Einstein toccò il triste compito di annunciare all'Accademia che Karl Schwarzschild era morto in seguito a una malattia contratta sul fronte russo.

Karl Schwarzschild con la toga accademica a Göttingen, in Germania. [Per gentile concessione dell'AIP Emilio Segré Visual Archives].

La geometria di Schwarzschild è il primo esempio concreto di curvatura dello spaziotempo che troviamo in questo libro. Per questo, e perché è fondamentale per le proprietà dei buchi neri, la esamineremo approfonditamente.

Se avessimo pensato per tutta la vita allo spazio e al tempo come a un «tessuto» spaziotemporale assoluto, unificato e quadridimensionale, sarebbe appropriato descrivere la geometria di Schwarzschild in termini di spaziotempo curvo (deformato) quadridimensionale. Tuttavia, la nostra esperienza quotidiana riguarda uno spazio tridimensionale e un tempo unidimensionale non unificati; pertanto, nella mia descrizione, lo spaziotempo deformato sarà suddiviso in uno spazio deformato più un tempo deformato.

Poiché lo spazio e il tempo sono «relativi» (il mio spazio e il mio tempo differiscono dal vostro, se ci muoviamo l'uno relativamente all'altro[2]), questa suddivisione richiede che prima si scelga un quadro di riferimento, ossia si scelga uno stato di moto. Per una stella c'è una scelta naturale, quella in cui è in stato di quiete, ossia il quadro di riferimento della stella stessa. In altre parole, è naturale esaminare lo spazio e il tempo della stella stessa anziché lo spazio e il tempo di qualcuno che si muova a velocità elevata attraverso la stella.

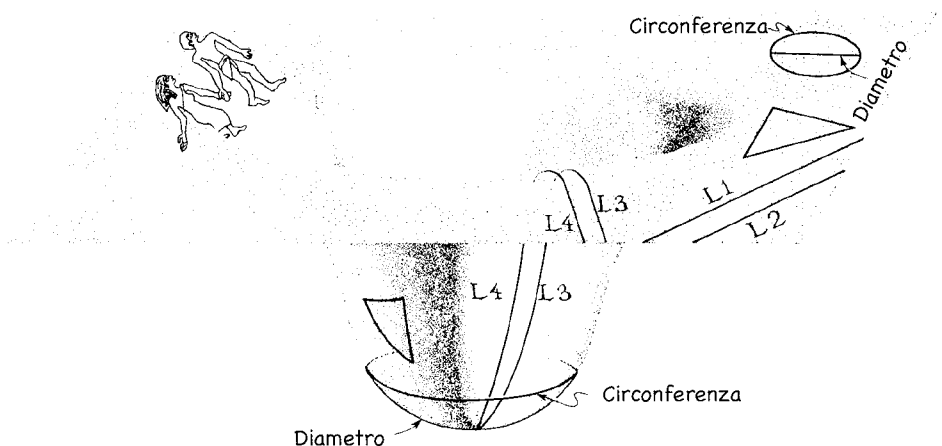
Per aiutare a visualizzare la curvatura (deformazione) dello spazio della stella utilizzerò un disegno chiamato diagramma a incasso. Dato che tali diagrammi svolgeranno un ruolo importante nei prossimi capitoli, introdurrò accuratamente il concetto con l'aiuto di un'analogia.

Immaginate una famiglia di umanoidi che vivono in un universo a due sole dimensioni spaziali. Il loro universo è la superficie curva, a forma di ciotola della figura 3.2. Essi, come il loro universo, sono bidimensionali, presentano uno spessore infinitesimale perpendicolarmente alla superficie. Inoltre, non possono vedere oltre la superficie; essi vedono per mezzo di raggi di luce che si muovono sulla superficie e non la lasciano mai. Perciò questi «esseri 2D», come li chiamerò, non hanno alcun modo di ottenere informazioni su nessuna cosa che si trovi al di fuori del loro universo bidimensionale.

Questi esseri 2D possono esplorare la geometria del loro universo bidimensionale effettuando misurazioni su linee rette, angoli, triangoli e cerchi. Le loro linee rette sono le «geodetiche» illustrate nel capitolo II (figura 2.4 e relativo testo): le linee più rette che esistono nel loro universo bidimensionale. Sul fondo della «ciotola» del loro universo che vediamo rappresentato nella figura 3.2 come il segmento di una sfera, le loro linee rette sono segmenti di grandi cerchi come l'equatore o i meridiani terrestri dalla longitudine costante. Oltre il bordo della ciotola il loro universo è piatto, e quindi le loro linee rette sono quelle che riconosceremmo come comuni linee rette.

Se gli esseri 2D esaminano una coppia qualsiasi di rette parallele nella parte esterna, piatta, del loro universo (ad esempio L1 e L2 nella figura 3.2), per quanto a lungo le seguano non le vedranno mai incrociarsi. In questo modo gli esseri scoprono che la regione esterna è piatta. D'altra parte, se costruiscono le linee rette parallele L3 e L4 oltre il bordo della ciotola e le fanno proseguire all'interno di essa mantenendole sempre il più rette possibile (mantenendole geodetiche), essi vedranno le linee incrociarsi sul fondo della ciotola. In questo modo, essi scoprono che la regione interna, a forma di ciotola, del loro universo è curva.

Gli esseri 2D possono scoprire che la parte esterna è piatta e che quella interna è curva anche misurando cerchi e triangoli (figura 3.2). Nella regione esterna le circonferenze di tutti i cerchi sono uguali a π (3,14159265…) volte i loro diametri. Nella loro regione interna le circonferenze dei cerchi sono meno di π volte i loro diametri; ad esempio, l'ampio cerchio tracciato vicino al fondo della ciotola nella figura 3.2 ha una circonferenza uguale a 2,5 volte il suo diametro. Quando gli esseri 2D costruiscono un triangolo i cui lati sono linee rette (geodetiche) e poi sommano gli angoli interni del triangolo, ottengono 180 gradi nella regione esterna, che è piatta, e più di 180 gradi nella regione interna, che è curva.

3.2 – Un universo bidimensionale popolato da esseri 2D

Avendo scoperto attraverso queste misurazioni che il loro universo è curvo, gli esseri 2D potrebbero cominciare a ipotizzare l'esistenza di uno spazio tridimensionale in cui il loro universo risiede – in cui esso è *incassato*. Essi potrebbero dare a quello spazio tridimensionale il nome di iperspazio, e fare congetture sulle sue proprietà; ad esempio, essi potrebbero supporre che sia «piatto» nel senso euclideo, in cui le linee rette parallele non si incrociano mai. Io e voi non abbiamo difficoltà a visualizzare questo iperspazio; è lo spazio tridimensionale della figura 3.2, lo spazio della nostra esperienza quotidiana. Tuttavia, gli esseri 2D, con la loro limitata esperienza bidimensionale, potrebbero avere grandi difficoltà a visualizzarlo. Inoltre, essi non hanno modo di venire a sapere se un simile iperspazio esista davvero. Non possono uscire dal loro universo bidimensionale ed entrare nella terza dimensione dell'iperspazio, e poiché vedono solo per mezzo di raggi luminosi che rimangono sempre dentro il loro universo, essi non potranno mai vedere dentro l'iperspazio. Per loro, l'iperspazio sarebbe del tutto ipotetico.

La terza dimensione dell'iperspazio non ha niente a che fare con la dimensione «tempo» degli esseri 2D, che essi potrebbero anche pensare come una terza dimensione. Quando pensano all'iperspazio, gli esseri in realtà dovrebbero pensare in termini di quattro dimensioni: due per lo spazio del loro universo, una per il tempo, e una per la terza dimensione dell'iperspazio.

Noi siamo esseri tridimensionali e viviamo in uno spazio curvo tridimensionale. Se dovessimo misurare la geometria del nostro spazio all'interno e in prossimità di una stella – la geometria di Schwarzschild – scopriremmo che è curva in modo strettamente analogo a quella dell'universo degli esseri 2D.

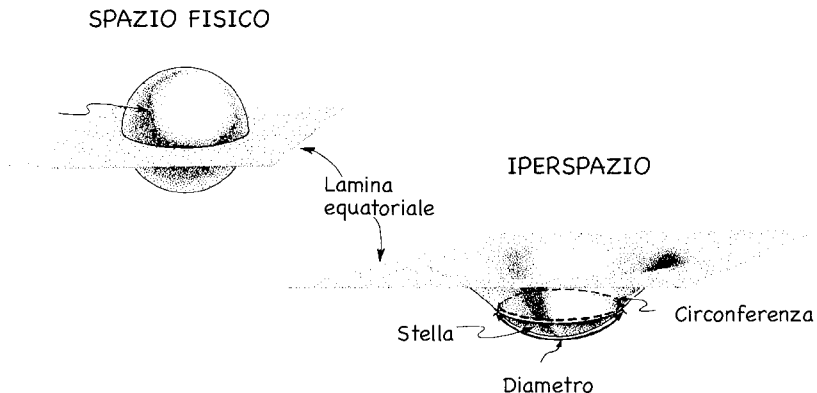
Possiamo ipotizzare un iperspazio piatto di dimensioni superiori al nostro, in cui il nostro spazio curvo tridimensionale è incassato. Risulta che un simile iperspazio deve avere sei dimensioni per accogliere uno spazio curvo tridimensionale come il nostro al suo interno (e se ricordiamo che il nostro universo ha anche una dimensione temporale, dobbiamo pensare in termini di sette dimensioni complessive).

Il fatto è che per me è tanto difficile visualizzare il nostro spazio tridimensionale incassato in un iperspazio esadimensionale quanto lo sarebbe per degli esseri 2D visualizzare il loro spazio bidimensionale incassato in un iperspazio tridimensionale. Tuttavia, esiste un espediente di grande aiuto, ed è illustrato nella figura 3.3.

La figura 3.3 mostra un esperimento mentale. Una sottile lamina di materiale è inserita dentro una stella all'altezza del suo piano equatoriale (in alto

a sinistra), in modo che bisezioni la stella delimitando due metà, una superiore e una inferiore, esattamente identiche. Sebbene sembri piatta nella figura, questa lamina equatoriale non lo è realmente. La massa della stella deforma lo spazio tridimensionale all'interno e attorno alla stella in un modo di cui la figura in alto a sinistra non può dare conto, e la deformazione curva la lamina equatoriale in un modo che la figura non mostra. Possiamo scoprire la curvatura della lamina effettuando misurazioni geometriche su di essa nel nostro spazio fisico reale, proprio come gli esseri 2D effettuano misurazioni nello spazio bidimensionale del loro universo. Tali misurazioni riveleranno che le linee rette che sono inizialmente parallele si incrociano in prossimità del centro della stella, che la circonferenza di qualsiasi cerchio all'interno o in prossimità della stella è inferiore a π volte il suo diametro, e che la somma degli angoli interni dei triangoli è superiore a 180 gradi. I particolari di queste distorsioni dello spazio curvo sono previsti dalla soluzione data da Schwarzschild all'equazione di Einstein.

Per facilitare la visualizzazione di questa curvatura di Schwarzschild, al pari degli esseri 2D, possiamo immaginare di estrarre la lamina equatoriale

3.3 – La curvatura dello spazio tridimensionale all'interno di una stella e intorno a essa (in alto a sinistra) raffigurata per mezzo di un *diagramma a incasso* (in basso a destra). Questa è la curvatura prevista dalla soluzione di Schwarzschild dell'equazione di campo di Einstein.

dallo spazio curvo tridimensionale del nostro Universo reale e incassarla in un fittizio iperspazio piatto tridimensionale (in basso a destra nella figura 3.3). Nell'iperspazio non curvo la lamina può mantenere la sua geometria curva solo distorcendosi verso il basso come una scodella. Questi diagrammi delle lamine bidimensionali del nostro Universo curvo, incassate in un ipotetico iperspazio tridimensionale piatto sono detti *diagrammi a incasso*.

La tentazione di pensare che la terza dimensione dell'iperspazio sia la stessa cosa della terza dimensione spaziale del nostro Universo è forte, ma dobbiamo evitarla. La terza dimensione dell'iperspazio non ha niente a che vedere con nessuna dimensione del nostro Universo. È una dimensione alla quale non possiamo accedere e che non possiamo vedere, e dalla quale non possiamo ricevere nessuna informazione; è puramente ipotetica. Ma è utile. Essa ci aiuta a visualizzare la geometria di Schwarzschild, e nel prosieguo di questo libro ci aiuterà a visualizzare altre geometrie dello spazio curvo: quelle dei buchi neri, delle onde gravitazionali, delle singolarità e dei cunicoli temporali (capitoli VI, VII, X, XIII e XIV).

Come mostra il diagramma a incasso della figura 3.3, la geometria di Schwarzschild della lamina equatoriale della stella è qualitativamente identica alla geometria dell'universo degli esseri 2D: all'interno della stella la geometria è curva, a forma di scodella, lontano dalla stella diventa piatta. Come nel caso del grande cerchio all'interno della scodella degli esseri 2D, anche qui (figura 3.3) la circonferenza della stella divisa per il suo diametro è inferiore a π. Per il nostro Sole, il rapporto tra circonferenza e diametro è previsto essere inferiore a π di alcune parti su un milione; in altre parole, all'interno del Sole, a eccezione di alcune parti su un milione, lo spazio è piatto. Tuttavia, se il Sole mantenesse la stessa massa e la sua circonferenza venisse resa sempre più piccola, la curvatura al suo interno si accentuerebbe sempre più, l'avvallamento verso il basso della scodella nel diagramma a incasso della figura 3.3 diventerebbe sempre più pronunciato e il rapporto tra circonferenza e diametro diventerebbe sostanzialmente inferiore a π.

Poiché lo spazio è diverso in quadri di riferimento diversi («il vostro spazio è un misto del mio spazio e del mio tempo, se ci muoviamo l'uno relativamente all'altro»), i particolari della curvatura spaziale della stella saranno diversi se misurati in un quadro di riferimento che si muove a velocità elevata relativamente alla stella o in un quadro in cui la stella è in stato di quiete. Nello spazio del quadro di riferimento che si muove a velocità elevata, la stella è un po' schiacciata perpendicolarmente alla direzione del suo moto, perciò il diagramma a incasso appare molto simile a quello della figura 3.3,

ma con la scodella compressa trasversalmente in una forma oblunga. Questo schiacciamento è la variante nello spazio curvo della contrazione dello spazio scoperta da Fitzgerald in un universo senza gravità (capitolo I).

La soluzione di Schwarzschild dell'equazione di campo di Einstein non descrive solo questa curvatura (o deformazione) dello spazio, ma anche una deformazione del tempo in prossimità della stella, una deformazione prodotta dalla forte gravità della stella stessa. In un quadro di riferimento in stato di quiete rispetto alla stella e che non le sfreccia accanto ad alta velocità, questa deformazione del tempo è esattamente la *dilatazione gravitazionale del tempo* di cui si è parlato nel capitolo II (scheda 2.4 e relativa discussione): vicino alla superficie della stella il tempo scorre più lentamente che non lontano da essa, e al centro della stella scorre ancora più lentamente.

Nel caso del Sole, la deformazione temporale è piccola: sulla superficie del Sole il tempo dovrebbe scorrere più lentamente appena di due parti su un milione (64 secondi in un anno) rispetto a luoghi lontani da essa, e al centro del Sole dovrebbe scorrere più lentamente di circa una parte su 100.000 (5 minuti in un anno). Tuttavia, se il Sole conservasse la stessa massa e la sua circonferenza venisse ridotta in modo che la superficie fosse più vicina al centro, la gravità sarebbe più forte e di conseguenza la sua dilatazione gravitazionale del tempo, la deformazione del tempo, sarebbe maggiore.

Una conseguenza di questa deformazione temporale è lo *spostamento gravitazionale verso il rosso* della luce emessa dalla superficie di una stella. Poiché la frequenza di oscillazione della luce è governata dallo scorrere del tempo nel luogo in cui essa viene emessa, la luce proveniente dagli atomi della superficie della stella avrà una frequenza inferiore quando raggiunge la Terra rispetto a quella emessa dallo stesso tipo di atomi nello spazio interstellare. La riduzione della frequenza sarà esattamente pari alla riduzione dello scorrere del tempo. Una minore frequenza comporta una lunghezza d'onda maggiore, perciò la luce di una stella deve venire spostata verso l'estremità tendente al rosso dello spettro nella stessa misura in cui il tempo viene dilatato sulla superficie della stella.

Sulla superficie del Sole la dilatazione del tempo è pari a due parti su un milione, perciò lo spostamento gravitazionale verso il rosso della luce che giunge sulla Terra dal Sole dovrebbe essere a sua volta pari a due parti su un milione. Era uno spostamento troppo esiguo perché potesse essere effettivamente misurato ai tempi di Einstein, ma agli inizi degli anni Sessanta la tecnologia cominciò a portarsi al livello delle leggi di gravità di Einstein: Jim Brault dell'Università di Princeton, nell'ambito di un esperimento molto

difficile, misurò lo spostamento verso il rosso della luce del Sole e ottenne un risultato che concordava armoniosamente con le previsioni di Einstein.

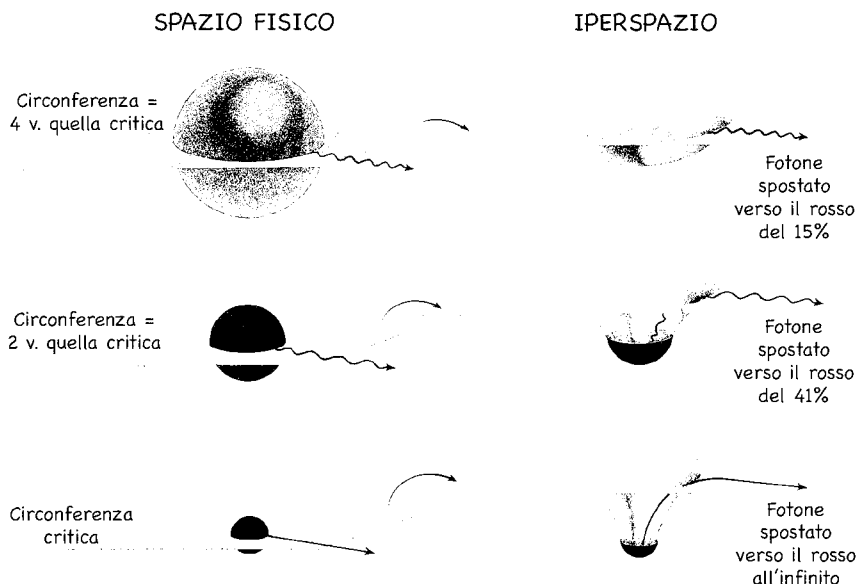
Pochi anni dopo la prematura morte di Schwarzschild, la sua geometria divenne uno strumento di lavoro standard per i fisici e gli astrofisici. Molti, Einstein compreso, la studiarono e calcolarono le sue implicazioni. Tutti concordarono e presero sul serio la conclusione secondo cui se la stella avesse una circonferenza alquanto ampia, come il Sole, lo spaziotempo al suo interno e intorno a essa dovrebbe essere curvo in misura molto esigua, e il colore della luce emessa dalla sua superficie e ricevuta dalla Terra dovrebbe subire uno spostamento verso il rosso. Tutti concordarono anche sul fatto che più la stella era compatta, maggiore doveva essere la deformazione dello spaziotempo e più marcato lo spostamento gravitazionale verso il rosso della luce emessa dalla sua superficie. Tuttavia, pochi erano inclini a prendere sul serio le previsioni estreme fornite dalla geometria di Schwarzschild riguardo alle stelle molto compatte (figura 3.4).

Secondo le previsioni della geometria di Schwarzschild, per ogni stella esiste una circonferenza critica che dipende dalla sua massa, la stessa circonferenza critica scoperta da John Michell e Pierre Simon Laplace più di un secolo prima: 18,5 chilometri per la massa della stella calcolata prendendo come unità di misura la massa del Sole. Se la circonferenza effettiva della stella è maggiore di quella critica di un fattore 4 (parte superiore della figura 3.4), lo spazio della stella sarà moderatamente curvo, così come mostrato nella figura, il tempo sulla sua superficie scorrerà più lentamente del 15% rispetto a un punto lontano da essa, e la luce emessa dalla sua superficie verrà spostata del 15% verso l'estremità rossa dello spettro. Se la circonferenza della stella è più piccola, solo il doppio di quella critica (parte centrale della figura 3.4), il suo spazio sarà curvo in misura più marcata, il tempo sulla sua superficie scorrerà più lentamente del 41% rispetto a un punto lontano da essa, e la luce emessa dalla sua superficie sarà spostata verso il rosso del 41%. Queste previsioni sembravano ragionevoli e accettabili. Ciò che non lo sembrava affatto ai fisici e agli astrofisici degli anni Venti, o perfino degli anni Sessanta, era la previsione riguardante una stella la cui circonferenza effettiva fosse uguale a quella critica (parte in fondo della figura 3.4). Su una stella del genere, con il suo spazio decisamente più curvo, lo scorrere del tempo in superficie è infinitamente dilatato; il tempo non scorre affatto, è congelato. Di conseguenza, di qualunque colore sia quando inizia il suo viaggio verso l'alto a partire dalla superficie della stella, la luce deve venire spostata oltre il rosso,

oltre l'infrarosso, oltre la lunghezza delle onde radio, fino a lunghezze d'onda infinite, ossia fino alla fine dell'esistenza. Nel linguaggio moderno, la superficie della stella, con la sua circonferenza critica, si trova esattamente sull'orizzonte di un buco nero; la stella, per mezzo della sua forte gravità, sta creando attorno a sé l'orizzonte di un buco nero.

La conclusione di questa illustrazione della geometria di Schwarzschild è la stessa cui giunsero Michell e Laplace: una stella tanto piccola da avere una circonferenza critica deve apparire completamente scura se vista da lontano; deve essere ciò che oggi chiamiamo un buco nero. La conclusione è la stessa, ma il meccanismo è completamente diverso.

Michell e Laplace, con la loro concezione newtoniana in cui lo spazio e il tempo sono assoluti e la velocità della luce è relativa, ritenevano che nel caso

3.4 – Le previsioni della relatività generale rispetto alla curvatura dello spazio e allo spostamento verso il rosso della luce emessa da tre stelle molto compatte con la stessa massa ma con circonferenze diverse. La prima è quattro volte più grande della circonferenza critica, la seconda due volte, e la terza ha esattamente la circonferenza critica. Nel linguaggio moderno, la superficie della terza stella è l'orizzonte di un buco nero.

di una stella appena più piccola della circonferenza critica i corpuscoli di luce sarebbero fuoriusciti a fatica. Si sarebbero elevati fino a grandi altezze al di sopra della stella, più alti di qualsiasi pianeta orbitante, ma nel loro viaggio sarebbero stati rallentati dalla gravità della stella, poi si sarebbero arrestati da qualche parte in mancanza di spazio interstellare, si sarebbero voltati e sarebbero stati attratti di nuovo dalla stella. Le creature presenti su un pianeta orbitante potrebbero vedere la stella grazie alla sua luce in lento movimento (a esse non sarebbe apparsa scura), mentre noi, che viviamo lontano sulla Terra non potremmo vederla affatto. La luce della stella non potrebbe raggiungerci. Per noi la stella sarebbe totalmente nera.

Al contrario, la curvatura dello spaziotempo di Schwarzschild prevedeva che la luce si propagasse sempre alla stessa velocità universale; essa non poteva essere rallentata in nessun caso (la velocità della luce è assoluta, ma lo spazio e il tempo sono relativi). Tuttavia, se viene emessa dalla circonferenza critica, la lunghezza d'onda della luce subisce uno spostamento infinito mentre percorre una distanza infinitesimale verso l'alto (lo spostamento di lunghezza d'onda deve essere infinito perché il flusso del tempo è infinitamente dilatato sull'orizzonte, e lo spostamento della lunghezza d'onda è sempre della stessa misura della dilatazione del tempo). Questo spostamento infinito della lunghezza d'onda, in effetti, esaurisce tutta l'energia della luce, e la luce pertanto cessa di esistere! Perciò, per quanto un pianeta possa trovarsi vicino alla circonferenza critica, le creature che vi abitano non possono vedere nessuna luce proveniente dalla stella.

Nel capitolo VII studieremo il comportamento della luce visto dall'interno della circonferenza critica di un buco nero, e scopriremo che dopotutto non cessa di esistere. Essa, piuttosto, è impossibilitata a sfuggire dalla circonferenza critica (l'orizzonte del buco) anche se si muove verso l'esterno alla velocità standard universale di 299.792 chilometri al secondo. Ma in questa fase iniziale del libro non siamo ancora in grado di capire un comportamento apparentemente così contraddittorio. Dobbiamo prima riuscire a capire altre cose, come hanno fatto i fisici durante i decenni trascorsi tra il 1916 e il 1960.

Durante gli anni Venti e fino agli anni Trenta, i più famosi esperti mondiali della relatività generale erano Albert Einstein e l'astrofisico inglese Arthur Eddington. C'erano altri che comprendevano la relatività, ma furono Einstein e Eddington a orientare il dibattito intellettuale sull'argomento. E, mentre altri erano disposti a prendere sul serio i buchi neri, Einstein e Eddington non lo erano. I buchi neri, semplicemente, non «quadravano», erano eccessiva-

mente stravaganti e contrastavano con le intuizioni di Einstein e di Eddington su come avrebbe dovuto comportarsi il nostro Universo.

Negli anni Venti Einstein sembra aver ignorato l'argomento. Nessuno insisteva affinché i buchi neri venissero considerati una previsione seria, perciò non vi era una grande necessità di sistemare le cose a tal riguardo. E dato che vi erano altri misteri della natura che a lui risultavano più interessanti ed enigmatici, Einstein dedicò le sue energie ad altro.

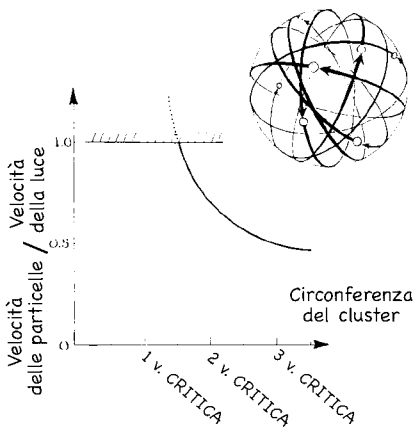
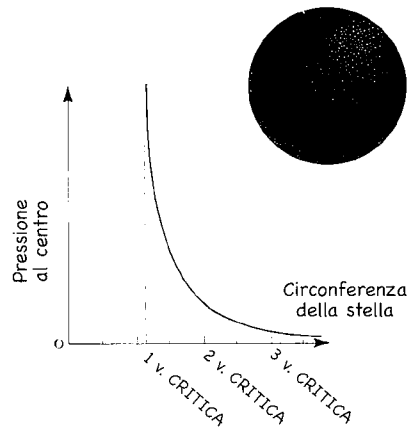
Eddington, negli anni Venti, adottò un approccio più eccentrico. Gli piaceva fare colpo e si divertiva a rendere la scienza accessibile all'uomo comune, e dato che nessuno li prendeva troppo sul serio, i buchi neri erano un grazioso giocattolo da far balenare davanti agli occhi del pubblico. Ecco perciò che nel 1926 lo troviamo a scrivere nel suo libro *The Internal Constitution of the Stars* che nessuna stella osservabile può essere più compatta della circonferenza critica: «In primo luogo», egli affermava, «la forza di gravità sarebbe così grande che la luce non riuscirebbe a sfuggirle e i raggi della stella ricadrebbero indietro come pietre sulla Terra. In secondo luogo, lo spostamento verso il rosso delle linee dello spettro sarebbe talmente marcato che lo spettro stesso cesserebbe di esistere. In terzo luogo, la massa provocherebbe una tale curvatura dello spaziotempo metrico che lo spazio si richiuderebbe attorno alla stella lasciandoci fuori (ossia in nessun luogo)». La prima conclusione era la versione newtoniana dell'impossibilità della luce di fuoriuscire; la seconda era una descrizione relativistica semiesatta; e la terza era una delle tipiche iperboli di Eddington. Come si evince chiaramente dai diagrammi a incasso della figura 3.4, quando una stella ha le dimensioni della circonferenza critica, la curvatura dello spazio è marcata, ma non infinita, e lo spazio non si avvolge affatto tutto intorno alla stella. Probabilmente Eddington lo sapeva, ma la sua descrizione creava una storia affascinante e coglieva in modo eccentrico lo spirito della curvatura dello spaziotempo di Schwarzschild.

Negli anni Trenta, come vedremo nel capitolo IV, le pressioni affinché si prendessero sul serio i buchi neri cominciarono ad aumentare. E man mano che si facevano più insistenti, Eddington, Einstein e altre figure di riferimento capaci di orientare il dibattito cominciarono a esprimere il loro inequivocabile dissenso rispetto a questi oggetti bizzarri.

Nel 1939 Einstein pubblicò un calcolo relativistico generale che egli interpretò come un esempio del perché i buchi neri non potevano esistere. I suoi calcoli analizzavano il comportamento di un tipo di oggetto immaginario con il quale, si poteva pensare, sarebbe stato possibile costruire un buco nero. L'oggetto era un cluster di particelle che si attiravano l'una con l'altra

gravitazionalmente, e in tal modo tenevano insieme il cluster stesso in modo analogo a quello in cui il Sole tiene insieme il Sistema Solare attirando gravitazionalmente gli altri pianeti. Le particelle del cluster di Einstein si muovevano tutte lungo orbite circolari attorno a un centro comune; le loro orbite formavano una sfera in cui le particelle che si trovavano su un lato attiravano gravitazionalmente quelle sull'altro (parte sinistra della figura 3.5).

Einstein immaginava di rendere il cluster sempre più piccolo, cercando di ridurre la sua circonferenza effettiva e di avvicinarla alla circonferenza critica. Come ci si poteva aspettare, i suoi calcoli indicavano che man mano che il cluster si faceva più compatto, la gravità sulla sua superficie sferica aumentava e le particelle che vi si trovavano dovevano muoversi più velocemente per evitare di essere attratte all'interno. Se il cluster fosse 1,5 volte la circonferenza critica, secondo i calcoli di Einstein, la sua gravità sarebbe così forte che le particelle dovrebbero muoversi a una velocità superiore a

3.5 – La prova di Einstein del fatto che nessun oggetto può essere piccolo quanto la sua circonferenza critica. A sinistra: se il cluster sferico di particelle di Einstein è più piccolo di 1,5 circonferenze critiche, la velocità delle particelle deve superare la velocità della luce, il che è impossibile. A destra: se una stella dalla densità costante è più piccola di 9/8 = 1,125 circonferenze critiche, la pressione al centro della stella deve essere infinita, il che è impossibile.

quella della luce per evitare di essere attratte all'interno. Dato che nulla può muoversi più rapidamente della luce, il cluster non avrebbe potuto in alcun modo essere più piccolo di 1,5 volte la circonferenza critica. «Il risultato essenziale di questa ricerca», scrisse Einstein, «è una spiegazione evidente del perché le "singolarità di Schwarzschild" non esistano nella realtà fisica».

A sostegno della sua tesi Einstein poteva addurre anche la struttura interna di una stella ideale, costituita da materia la cui densità è costante in tutto il suo interno (parte destra della figura 3.5). Una stella di questo tipo era al riparo dal rischio di esplodere a causa della pressione del gas al suo interno. Karl Schwarzschild aveva usato la relatività generale per dedurre una descrizione matematica completa di una stella simile, e le sue formule indicavano che, se si rende la stella sempre più compatta per contrastare la maggiore forza della sua gravità interna, la pressione interna della stella deve aumentare sempre più. Quando la circonferenza della stella, nel corso del suo processo di riduzione, si avvicina a $9/8 = 1{,}125$ volte la circonferenza critica, secondo le formule di Schwarzschild, la pressione centrale diventa infinita. Dato che nessun gas reale (né nessun altro tipo di materia) può produrre una pressione davvero infinita, Einstein riteneva che le dimensioni di una stella simile non avrebbero mai potuto arrivare a essere uguali a 1,125 volte la circonferenza critica.

I calcoli di Einstein erano corretti, ma la sua interpretazione del loro significato non lo era. Il messaggio che ne aveva ricavato, che nessun oggetto può diventare più piccolo della circonferenza critica, era dovuto più al suo rifiuto intuitivo delle singolarità di Schwarzschild che ai calcoli stessi. Il messaggio corretto, come noi oggi sappiamo a posteriori, era il seguente: il cluster di particelle di Einstein e la stella a densità costante non avrebbero mai potuto essere tanto compatti da formare un buco nero perché Einstein prevedeva che una qualche forza al loro interno controbilanciasse l'attrazione della gravità: la forza della pressione del gas, nel caso della stella; la forza centrifuga dovuta ai movimenti delle particelle, nel caso del cluster. In effetti, è vero che nessuna forza può resistere all'attrazione della gravità quando un oggetto è molto vicino alla circonferenza critica. Ma ciò non significa che l'oggetto non possa mai essere così piccolo. Piuttosto, ciò significa che se l'oggetto diventa più piccolo, la gravità sovrasta necessariamente tutte le altre forze all'interno dell'oggetto e comprime quest'ultimo in una catastrofica implosione, che crea un buco nero. Dato che i calcoli di Einstein non contemplavano la possibilità di un'implosione (la lasciò fuori da ogni equazione), egli non colse il messaggio.

Oggi siamo così abituati all'idea dei buchi neri che è difficile non domandarsi: «Come ha potuto Einstein essere così ottuso? Come ha potuto ignorare la cosa davvero importante, l'implosione che crea i buchi neri?». Una simile reazione rivela la nostra ignoranza sulla mentalità di quasi *tutti* negli anni Venti e Trenta.

Le previsioni della relatività generale erano assai poco comprese. Nessuno si rendeva conto che un oggetto sufficientemente compatto *deve* implodere e che l'implosione produrrà un buco nero. Invece ci si immaginava, sbagliando, che le singolarità di Schwarzschild (i buchi neri) fossero oggetti che galleggiavano sulla loro circonferenza critica o appena al suo interno, e che potevano contrastare la forza di gravità grazie a una qualche forza interna; pertanto, Einstein pensò di potersi liberare dei buchi neri mostrando che niente che non sia sorretto da una forza interna può essere piccolo quanto la circonferenza critica.

Se Einstein avesse sospettato che le «singolarità di Schwarzschild» possono esistere davvero avrebbe potuto rendersi conto del fatto che l'implosione è la chiave che permette la loro formazione e che le forze interne sono irrilevanti. Me egli era così fermamente convinto che non potessero esistere («suonavano falsi», terribilmente falsi) da essere vittima di un impenetrabile blocco mentale nei confronti della verità, come quasi tutti i suoi colleghi.

Nel romanzo epico di T.H. White, *Re in eterno*, viene raffigurata una società di formiche il cui motto è «tutto ciò che non è proibito è obbligatorio». *Non* è così che funzionano le leggi della fisica e l'Universo reale. Molte cose consentite dalle leggi della fisica sono tanto improbabili che nella pratica non accadono mai. Un esempio semplice e ormai logoro è la ricostituzione spontanea di un uovo a partire dai suoi frammenti spiaccicati sul pavimento. Prendete l'immagine al rallentatore di un uovo che cade sul pavimento e si frantuma spargendo intorno pezzetti solidi e sostanza gelatinosa, fate andare il filmato all'indietro e osservate l'uovo riformarsi spontaneamente e volare indietro in aria. Le leggi della fisica permettono una simile rigenerazione con il tempo che continua a procedere in avanti, ma in pratica non accade mai, perché è altamente improbabile.

Gli studi dei fisici sui buchi neri negli anni Venti e Trenta e perfino negli anni Quaranta e Cinquanta, cercavano solo di stabilire se le leggi della fisica *permettevano* l'esistenza di oggetti del genere, e la risposta era equivoca: a prima vista i buchi neri sembravano ammissibili. Poi Einstein, Eddington e altri illustrarono degli argomenti (sbagliati) secondo cui essi erano proibiti.

Negli anni Cinquanta, quando tali argomenti vennero definitivamente smentiti, molti fisici passarono a sostenere che i buchi neri potevano anche essere ammissibili, ma sono così altamente improbabili (come il riassemblaggio dell'uovo) che nella pratica non accadono mai.

In realtà, la presenza dei buchi neri, diversamente dalle uova che si riformano, è obbligatoria in alcune situazioni comuni, ma solo verso la fine degli anni Sessanta, quando le prove della loro necessità divennero schiaccianti, la maggior parte dei fisici cominciò a prenderli sul serio. Nei prossimi tre capitoli descriverò come queste prove si siano accumulate dagli anni Trenta agli anni Sessanta, e la diffusa resistenza che incontrarono.

L'ampia e quasi universale resistenza nei confronti dei buchi neri riscontrata nel XX secolo è in netto contrasto con l'entusiasmo con cui essi vennero accolti nel XVIII secolo al tempo di John Michell e Pierre Simon Laplace. Werner Israel, un fisico moderno dell'Università di Alberta, ha studiato la storia approfonditamente e ha riflettuto sulle ragioni di questa differenza di atteggiamento.

«Sono certo [che l'accettazione dei buchi neri nel XVIII secolo] non era solo un sintomo del fervore rivoluzionario dell'ultimo decennio del secolo», scrive Israel. «La spiegazione deve risiedere nel fatto che le stelle scure di Laplace [i buchi neri] non mettevano a repentaglio la nostra fede nella persistenza e stabilità della materia. Al contrario, i buchi neri del XX secolo costituiscono una grave minaccia per tale fede».

Michell e Laplace immaginarono entrambi che le loro stelle scure fossero fatte di materia all'incirca della stessa densità dell'acqua, della terra, delle rocce, o del Sole, più o meno un grammo per centimetro cubico. Con questa densità, una stella, per essere scura (per essere contenuta entro la sua circonferenza critica) deve avere una massa circa 140 milioni di volte più grande di quella del Sole e una circonferenza circa tre volte più ampia dell'orbita terrestre. Stelle del genere, governate dalle leggi newtoniane della fisica, possono apparire esotiche, ma di certo non costituivano una minaccia per nessuna idea radicata sulla natura. Se si voleva vedere la stella, bastava atterrare su un pianeta vicino a essa e osservare i suoi corpuscoli luminosi alzarsi nelle loro orbite prima di precipitare di nuovo sulla sua superficie. Se si voleva prelevare un campione del materiale di cui era fatta la stella, bastava scendere in volo fin sulla sua superficie, prelevarne un po' e riportarlo sulla Terra per analizzarlo in laboratorio. Non so se Michell, Laplace o altri della loro epoca facessero ipotesi su tali aspetti, ma è chiaro che qualora le abbiano fatte, ciò

non comportava alcun motivo di preoccupazione a proposito delle leggi della natura e la persistenza e stabilità della materia.

La circonferenza critica (orizzonte) di un buco nero del XX secolo costituisce una sfida assai diversa. Da nessuna altezza al di sopra dell'orizzonte è possibile vederne fuoriuscire della luce. Qualsiasi cosa cada oltre l'orizzonte non potrà mai riemergere da lì; è perduta per il nostro Universo, una perdita che costituisce una seria sfida ai concetti dei fisici circa la conservazione della massa e dell'energia.

«Vi è un curioso parallelo tra la storia dei buchi neri e quella della deriva dei continenti [il movimento reciproco di deriva dei continenti terrestri]», scrive Israel. «In entrambi i casi le prove non potevano essere ignorate già nel 1916, ma entrambe le idee vennero bloccate nel loro cammino per mezzo secolo da una resistenza ai limiti dell'irrazionale. Credo che la ragione psicologica alla base di tutto ciò fosse la stessa in entrambi i casi. Un'altra coincidenza: in entrambi i casi la resistenza ha cominciato a sgretolarsi intorno al 1960. Ovviamente, entrambi i campi [l'astrofisica e la geofisica] hanno beneficiato degli sviluppi tecnologici del dopoguerra. Cionondimeno, è interessante che quello fosse il momento in cui la bomba H e lo Sputnik dell'Unione Sovietica stavano spazzando via il concetto di una scienza occidentale monolitica e impossibile da scalfire e, forse, instillando il sospetto che potesse esserci qualcosa di più in cielo e in Terra di quanto la scienza occidentale fosse pronta a sognare».

IV. IL MISTERO DELLE NANE BIANCHE

Dove Eddington e Chandrasekhar disputano sulla morte delle stelle massive; quando muoiono devono contrarsi dando vita ai buchi neri? O la meccanica quantistica le salverà?

L'anno era il 1928, il luogo la città di Madras nel Golfo del Bengala, nell'India sudorientale. Lì, al Presidency College, un diciassettenne indiano di nome Subrahmanyan Chandrasekhar era immerso nello studio della fisica, della chimica e della matematica. Chandrasekhar era alto e bello, dal portamento regale e orgoglioso dei suoi successi accademici. Aveva letto da poco il classico libro di testo di Arnold Sommerfeld *Atomic Structure and Spectral Lines* ed era entusiasta del fatto che Sommerfeld, uno dei più grandi fisici teorici del mondo, fosse venuto in visita a Madras da Monaco, dove abitava.

Desideroso di conoscerlo personalmente, Chandrasekhar si presentò all'hotel di Sommerfeld e gli chiese un incontro. Sommerfeld gli concesse un incontro di lì a qualche giorno.

Il giorno dell'appuntamento, Chandrasekhar, pieno d'orgoglio e di fiducia nella sua conoscenza della fisica moderna, si recò all'hotel di Sommerfeld e bussò alla sua porta. Sommerfeld lo salutò cortesemente, gli chiese dei suoi studi e poi lo ridimensionò. «La fisica che lei ha studiato appartiene al passato. La fisica è completamente cambiata nei cinque anni trascorsi da quando il mio libro è stato scritto», gli spiegò. Egli proseguì descrivendo la rivoluzione che era avvenuta nella visione che i fisici avevano delle leggi che governano il regno del microscopico: il regno degli atomi, delle molecole, degli elettroni e dei fotoni. In tale regno, le leggi newtoniane si erano rivelate erronee in modi non previsti dalla relatività. Esse erano state sostituite da un insieme di leggi fisiche radicalmente nuovo, leggi chiamate *meccanica quantistica*[1] perché riguardavano il comportamento (la «meccanica») di particelle di materia («quanti»). Sebbene avessero appena due anni di storia, le nuove leggi della meccanica quantistica stavano già riuscendo con successo a spiegare il comportamento degli atomi e delle molecole.

Chandrasekhar aveva letto nel libro di Sommerfeld la prima versione provvisoria delle nuove leggi. Ma le leggi quantistiche iniziali non erano soddisfacenti, gli spiegò Sommerfeld. Malgrado concordassero con gli esperimenti su atomi e molecole semplici come l'idrogeno, esse non spiegavano il comportamento di atomi e molecole più complicati, e non si collegavano in modo logico e coerente tra loro né con le altre leggi della fisica. Erano poco più di un miscuglio di regole di calcolo ad hoc e disarmoniche.

La nuova versione di tali leggi, pur se radicale nella forma, sembrava assai più promettente. Riusciva a spiegare atomi e molecole complicati e sembrava connettersi bene con il resto della fisica.

Chandrasekhar ascoltava i particolari, ipnotizzato.

La meccanica quantistica e le viscere delle nane bianche

Al momento di separarsi, Sommerfeld diede a Chandrasekhar le bozze di un articolo tecnico che aveva appena scritto. Esso illustrava uno sviluppo delle leggi della meccanica quantistica che governano folti gruppi di elettroni compressi in volumi ridotti, ad esempio, in un metallo.

Chandrasekhar rimase affascinato dall'articolo di Sommerfeld, lo comprese e passò molti giorni nella biblioteca dell'università studiando tutte le ricerche che riusciva a trovare su quegli aspetti. Di particolare interesse risultò un articolo intitolato *On Dense Matter* del fisico inglese R.H. Fowler, pubblicato nel numero del 10 dicembre 1926 di «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society». L'articolo di Fowler segnalò a Chandrasekhar un libro estremamente affascinante, *The Internal Constitution of the Stars*, dell'eminente fisico inglese Arthur S. Eddington, in cui egli trovò una descrizione del *mistero delle stelle nane bianche*.

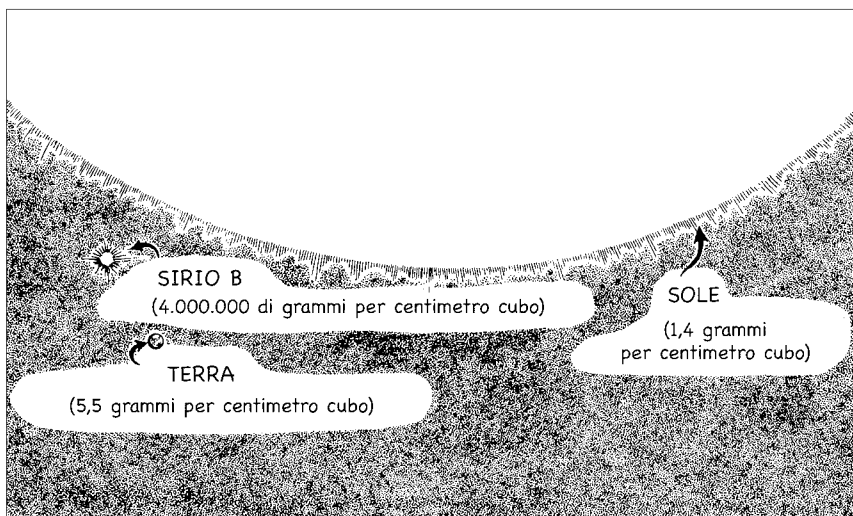
Le nane bianche sono un tipo di stelle che gli astronomi hanno scoperto grazie ai loro telescopi. L'aspetto misterioso delle nane bianche era l'estrema densità della materia al loro interno, una densità molto superiore a quella mai incontrata prima dagli esseri umani. Chandrasekhar non poteva saperlo in alcun modo quando aprì il libro di Eddington, ma la battaglia per scoprire il mistero di questa alta densità avrebbe infine costretto lui e Eddington a prendere in esame la possibilità che le stelle massive, quando muoiono, possano contrarsi fino a formare dei buchi neri.

«Le nane bianche sono probabilmente molto numerose», lesse Chandrasekhar nel libro di Eddington. «Ne conosciamo con certezza soltanto tre,

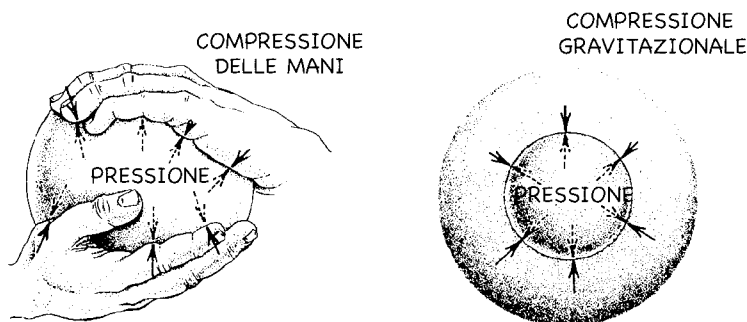
ma sono tutte a poca distanza dal Sole... la più famosa di queste stelle è la compagna della stella [comune] chiamata Sirio», che porta il nome di *Sirio B*. Sirio e Sirio B sono la sesta e la settima stella più vicine alla Terra, 8,6 anni luce, e Sirio è la stella più luminosa del nostro cielo. Sirio B orbita attorno a Sirio esattamente come la Terra orbita attorno al Sole, ma Sirio B impiega cinquant'anni a completare la sua orbita, la Terra solo uno.

Eddington descriveva in che modo, in base alle osservazioni al telescopio, gli astronomi avevano calcolato la massa e la circonferenza di Sirio B. La massa era pari a 0,85 masse solari; la circonferenza misurava 118.000 chilometri. Ciò significava che la densità media di Sirio B era di 61.000 grammi per centimetro cubo – una densità 61.000 volte superiore a quella dell'acqua e pari all'incirca a una tonnellata per pollice cubo. «Questo aspetto è stato noto per anni», scriveva Eddington. «Penso che generalmente sia sembrato opportuno aggiungere il commento "il che è assurdo"». La maggior parte degli astronomi non poteva prendere sul serio una densità tanto superiore a quella mai incontrata sulla Terra, e se avessero saputo l'effettiva verità, rivelata dalle osservazioni astronomiche più moderne (una massa pari a 1,05 volte quella del Sole, una circonferenza di 31.000 chilometri e una densità di quattro milioni di grammi per centimetro cubo, o 60 tonnellate per pollice cubo), l'avrebbero considerata ancora più assurda (si veda la figura 4.1).

Eddington proseguiva descrivendo una nuova osservazione cruciale che rafforzava la «conclusione assurda». Se Sirio B fosse stata realmente 61.000 volte più densa dell'acqua, secondo le leggi della gravità di Einstein, la luce che fuoriusciva dal suo intenso campo gravitazionale avrebbe dovuto essere spostata verso il rosso di 6 parti su 100.000, uno spostamento 30 volte maggiore di quello della luce proveniente dal Sole, e quindi più facile da misurare. Questa previsione dello spostamento verso il rosso, a quanto pareva, era stata provata e verificata poco prima che il libro di Eddington venisse stampato, nel 1925, dall'astronomo W.S. Adams all'osservatorio di Mount Wilson, ubicato in cima a una montagna sopra Pasadena, in California[2]. «Il professor Adams ha preso due piccioni con una fava», scrisse Eddington, «egli ha effettuato un'ulteriore verifica della teoria delle relatività generale di Einstein e ha confermato la nostra ipotesi che una materia 2000 volte più densa del platino non solo è possibile, ma è effettivamente presente nell'Universo».

Inoltre, nel libro di Eddington, Chandrasekhar trovò una descrizione di come la struttura interna di una stella, come il Sole o Sirio B, sia governata dall'equilibrio tra la pressione interna e la compressione gravitazionale. Que-

4.1 – Confronto tra le dimensioni e le densità medie del Sole, della Terra e della nana bianca Sirio B, in base ai dati moderni.

sto equilibrio compressione/pressione può essere compreso (anche se questo non era il metodo di Eddington) attraverso un'analogia con la compressione esercitata dalle mani su un palloncino (parte sinistra della figura 4.2). La forza diretta verso l'interno esercitata dalla stretta delle mani viene controbilanciata esattamente da quella diretta verso l'esterno della pressione dell'aria, creata dalle molecole d'aria contenute all'interno del palloncino e che ne bombardano le pareti di gomma.

Per una stella (parte destra della figura 4.2), l'analogo della compressione esercitata dalle mani è il peso di un involucro esterno di materia stellare, e l'analogo dell'aria nel palloncino è la sfera di materia contenuta all'interno di quell'involucro. Il confine tra sfera interna e involucro esterno può essere stabilito dove si vuole, a un metro di profondità all'interno della stella, a un chilometro o a mille chilometri. Ovunque si scelga di collocarlo, esso deve soddisfare il requisito per cui il peso dell'involucro esterno che preme sulla sfera interna (la «compressione gravitazionale» dell'involucro esterno) sia perfettamente controbilanciato dalla pressione delle molecole della sfera interna che bombardano l'involucro esterno. Questo equilibrio, rispettato in ogni singolo punto al suo interno, determina la *struttura* della stella; ossia,

4.2 – *A sinistra*: L'equilibrio tra la compressione esercitata dalle mani e la pressione all'interno di un palloncino. *A destra*: L'analogo equilibrio tra la compressione gravitazionale (peso) di un involucro esterno di materia stellare e la pressione di una sfera interna di materia stellare.

determina i particolari del modo in cui la pressione, la gravità e la densità della stella variano dalla superficie al centro.

Il libro di Eddington illustrava inoltre un inquietante paradosso riguardante le conoscenze dell'epoca sulla struttura delle nane bianche. Eddington credeva – e in effetti nel 1925 tutti gli astronomi credevano – che la pressione della materia delle nane bianche, come quella del palloncino dell'esempio, dovesse essere provocata dal suo calore. Il calore fa viaggiare gli atomi della materia all'interno della stella ad alta velocità, essi si bombardano tra loro e bombardando l'interfaccia tra l'involucro esterno e la sfera interna della stella. Se assumiamo un punto di vista «macroscopico», troppo grossolano per individuare i singoli atomi, tutto ciò che possiamo misurare è la forza complessiva del bombardamento di tutti gli atomi che colpiscono, ad esempio, un centimetro quadrato dell'interfaccia. Questa forza complessiva è la pressione della stella.

Poiché emettendo radiazioni nello spazio la stella si raffredda, i suoi atomi fluttueranno più lentamente, la loro pressione si ridurrà, e il peso dell'involucro esterno della stella comprimerà la sfera interna riducendone il volume. La compressione esercitata su di essa, tuttavia, fa nuovamente riscaldare la sfera aumentandone la pressione; in tal modo è possibile raggiungere un nuovo equilibrio compressione/pressione, nel quale la stella è leggermente

più piccola di prima. Perciò, mentre continua a raffreddarsi gradualmente irradiando calore nello spazio interstellare, Sirio B deve ridursi gradualmente di dimensione.

Come si conclude questo graduale rimpicciolimento? Quale sarà il destino finale di Sirio B? La risposta più ovvia (ma errata), secondo cui la stella si sarebbe ridotta fino a essere così piccola da diventare un buco nero, suonava come un anatema per Eddington, che si rifiutava perfino di prenderla in considerazione. La sola risposta ragionevole, egli affermava, era che la stella doveva raffreddarsi definitivamente e poi sostenersi non grazie alla pressione termica (ossia, la pressione indotta dal calore), ma al solo tipo di pressione noto nel 1925: la pressione che si trova in oggetti solidi come le rocce, una pressione dovuta alla repulsione tra atomi adiacenti. Ma questa pressione analoga a quella delle rocce era possibile, riteneva (erroneamente) Eddington, solo se la materia della stella aveva una densità simile a quella delle rocce, cioè pochi grammi per centimetro cubo, diecimila volte meno dell'attuale densità di Sirio B.

Questa linea di pensiero portò al paradosso di Eddington. Per espandersi di nuovo fino alla densità della roccia ed essere quindi in grado di sostenersi una volta divenuta fredda, Sirio B avrebbe dovuto effettuare un lavoro enorme per resistere alla propria gravità, e i fisici non conoscevano nessuna fonte di energia all'interno della stella che potesse alimentarlo. «Immaginate un corpo che perda continuamente calore ma che abbia un'energia insufficiente per diventare freddo!», scrisse Eddington. «È un problema curioso e si possono avanzare molte ipotesi fantasiose su cosa accada realmente. In questa sede tralasceremo questa difficoltà considerandola non necessariamente determinante».

Chandrasekhar aveva trovato la soluzione a questo paradosso del 1925 nell'articolo di R.H. Fowler, *On Dense Matter*, del 1926. La soluzione sta nelle carenze delle leggi della fisica usate da Eddington. Tali leggi dovevano essere sostituite dalla nuova meccanica quantistica, che descriveva la pressione all'interno di Sirio B e di altre nane bianche come dovuta non al calore, ma a un nuovo fenomeno meccanico quantistico: il *moto degenere degli elettroni*, detto anche *degenerazione degli elettroni*[3].

La degenerazione degli elettroni è in qualche modo simile alla claustrofobia umana. Quando la materia viene compressa a una densità diecimila volte superiore a quella delle rocce, la nube di elettroni attorno a ognuno dei suoi nuclei atomici viene schiacciata in uno spazio diecimila volte più piccolo. Ogni elettrone si ritrova quindi confinato in una «cella», una zona di volume

diecimila volte più piccolo di quello in cui prima poteva muoversi. Con così poco spazio disponibile, l'elettrone, come una persona claustrofobica, comincia ad agitarsi in maniera incontrollata. Turbina nella sua zona ristretta ad alta velocità, scontrandosi con forza contro gli elettroni adiacenti nelle rispettive celle. Questo *moto degenere*, come lo chiamano i fisici, non può essere interrotto raffreddando la materia. Niente può interromperlo; è imposto agli elettroni dalle leggi della meccanica quantistica, anche quando la materia si trova alla temperatura dello zero assoluto.

Il moto degenere è una conseguenza di una caratteristica della materia che i fisici newtoniani non avevano neppure sognato, una caratteristica chiamata dualismo onda/particella. Ogni tipo di particella, secondo la meccanica quantistica, a volte si comporta come un'onda e ogni tipo di onda a volte si comporta come una particella. Quindi onde e particelle sono in realtà la stessa cosa, una «cosa» che a volte si comporta come un'onda e altre come una particella (si veda la scheda 4.1).

La degenerazione degli elettroni è facilmente comprensibile in termini di dualismo onda/particella. Quando la materia viene compressa ad alte densità, e ogni elettrone al suo interno viene confinato in una cella estremamente piccola schiacciata contro le celle degli elettroni confinanti, l'elettrone comincia a comportarsi in parte come un'onda. La lunghezza d'onda dell'onda dell'elettrone (la distanza tra le sue creste) non può essere più ampia della cella dell'elettrone: se lo fosse, l'onda si estenderebbe oltre la cella. Ora, le particelle con una lunghezza d'onda molto breve sono necessariamente dotate di grande energia (un esempio comune è quello della particella associata a un'onda elettromagnetica, il fotone. Un fotone dei raggi X ha una lunghezza d'onda molto più breve di quella di un fotone della luce, e di conseguenza i fotoni dei raggi X sono dotati di un'energia molto maggiore rispetto ai fotoni della luce. La loro maggiore energia consente ai fotoni dei raggi X di attraversare la carne e le ossa del corpo umano.

Nel caso di un elettrone all'interno di una materia molto densa, la breve lunghezza d'onda associata a un'elevata energia comporta un moto rapido, e ciò significa che l'elettrone deve turbinare dentro la sua cella comportandosi come un mutante erratico ad alta velocità: metà particella e metà onda. I fisici dicono che l'elettrone è «degenere» e chiamano la pressione generata dal suo rapido moto erratico «pressione di degenerazione degli elettroni». Non c'è modo di liberarsi di questa pressione di degenerazione; è una conseguenza inevitabile del fatto che l'elettrone si trova confinato in una cella così piccola. Inoltre, maggiore è la densità della materia, più piccola è la cel-

Scheda 4.1
BREVE STORIA DEL DUALISMO ONDA/PARTICELLA

Già ai tempi di Isaac Newton (alla fine del Seicento), i fisici si arrovellavano cercando di capire se la *luce* fosse fatta di particelle o di onde. Newton, anche se ambiguo a riguardo, propendeva per le particelle e le chiamava *corpuscoli*, mentre Christiaan Huygens propendeva per le onde. La concezione particellare di Newton prevalse fino agli inizi dell'Ottocento, quando la scoperta del fatto che la luce può interferire con se stessa (capitolo X) convertì i fisici al punto di vista di Huygens. A metà dell'Ottocento, James Clerk Maxwell diede delle basi solide all'interpretazione della luce come onda con le sue leggi unificate dell'elettricità e del magnetismo, e i fisici pensarono che la questione fosse ormai stata risolta. Ma questo avveniva prima della meccanica quantistica.

Negli anni Novanta del XIX secolo, Max Planck colse alcuni indizi nella forma dello spettro della luce emessa da oggetti molto caldi, in base ai quali si poteva pensare che ci fosse qualche carenza nella visione che i fisici avevano della luce. Einstein, nel 1905, mostrò cosa mancava: la luce si comporta a volte come un'onda e altre volte come una particella (oggi chiamata *fotone*). Si comporta come un'onda, spiegava Einstein, quando interferisce con se stessa; ma si comporta come una particella nell'*effetto fotoelettrico*. Quando un debole fascio di luce colpisce un pezzo di metallo, da esso si diparte un elettrone alla volta, proprio come se delle singole particelle di luce (singoli fotoni) colpissero gli elettroni e li espellessero dalla superficie metallica uno a uno. Dall'energia degli elettroni Einstein dedusse che l'energia del fotone è sempre inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della luce. Quindi, le proprietà della luce in quanto fotone e in quanto onda sono interconnesse; la lunghezza d'onda è inesorabilmente legata all'energia del fotone. La scoperta del dualismo onda/particella della luce e le leggi fisiche sperimentali della meccanica quantistica che egli cominciò a elaborare sulle basi di tale scoperta valsero a Einstein il premio Nobel nel 1921. Malgrado avesse formulato quasi da solo la relatività generale, Einstein fu solo uno dei molti che contribuirono a definire le leggi della meccanica quantistica, le leggi del «regno dell'estremamente piccolo».

Quando scoprì il dualismo onda/particella della luce, Einstein non si rese conto che un elettrone o un protone possono a loro volta comportarsi

sia come particelle che come onde. Nessuno se ne accorse fino alla metà degli anni Venti, quando Louis de Broglie formulò questa ipotesi e Erwin Schrödinger la utilizzò come base per un intero corpus di leggi della meccanica quantistica, leggi in cui un elettrone è un'onda di probabilità. Probabilità di cosa? Di ubicazione di una particella. Con queste «nuove» leggi della meccanica quantistica (estremamente efficaci nello spiegare il comportamento di elettroni, protoni, atomi e molecole) non avremo molto a che fare in questo libro. Tuttavia, di tanto in tanto, alcune delle loro caratteristiche risulteranno importanti. In questo capitolo, la caratteristica importante è la degenerazione degli elettroni.

la, più breve è la lunghezza d'onda dell'elettrone, più elevata è la sua energia e più veloce è il suo moto, e pertanto maggiore è la sua pressione di degenerazione. Nella materia ordinaria, con densità ordinarie, la pressione di degenerazione è talmente esigua che non la si nota, ma alle gigantesche densità delle nane bianche essa è enorme.

Quando Eddington scrisse il suo libro, la degenerazione degli elettroni non era ancora stata prevista, e non era possibile calcolare correttamente come avrebbero risposto le rocce o altri materiali se fossero stati compressi fino a densità superelevate come quella di Sirio B. Disponendo delle leggi sulla degenerazione degli elettroni, ora questi calcoli erano possibili ed erano stati ideati e realizzati da R.H. Fowler nel suo articolo del 1926.

In base ai calcoli di Fowler, dato che gli elettroni di Sirio B e di altre nane bianche sono stati compressi in celle così piccole, la loro pressione di degenerazione è molto più elevata della loro pressione termica (indotta dal calore). Di conseguenza, quando Sirio B si sarà raffreddata, la sua minuscola pressione termica scomparirà, ma la sua enorme pressione di degenerazione permarrà e continuerà a permetterle di resistere alla gravità.

Pertanto, la soluzione del paradosso di Eddington sulle nane bianche era duplice: 1) non era principalmente la pressione termica a difendere Sirio B dalla gravità, come tutti pensavano prima dell'avvento della nuova meccanica quantistica, ma la pressione di degenerazione; 2) quando Sirio B si sarebbe raffreddata non avrebbe avuto bisogno di espandersi di nuovo alla densità della roccia per sostenersi, ma sarebbe stata sostenuta in modo soddisfacente

dalla pressione di degenerazione alla sua attuale densità di quattro milioni di grammi per centimetro cubo.

Chandrasekhar, nella biblioteca di Madras, era incantato dalla lettura di queste tesi e dallo studio delle loro formulazioni matematiche. Era il suo primo contatto con l'astronomia moderna e vi scopriva, una dietro l'altra, le importanti conseguenze delle due rivoluzioni avvenute nella fisica nel XX secolo: la relatività generale di Einstein, con le sue nuove concezioni dello spazio e del tempo, si manifestava nello spostamento gravitazionale verso il rosso della luce emessa da Sirio B; e la nuova meccanica quantistica, con il suo dualismo onda/particella, spiegava la pressione interna di Sirio B. Questa astronomia era un campo fertile in cui un giovane poteva lasciare il segno.

Nel corso dei suoi studi universitari a Madras, Chandrasekhar esplorò ulteriormente le conseguenze che la meccanica quantistica aveva per l'Universo astronomico. Egli scrisse perfino un breve articolo sulle sue idee, lo inviò in Inghilterra a R.H. Fowler, che non aveva mai incontrato, e questi fece in modo che venisse pubblicato.

Infine, nel 1930, all'età di diciannove anni, Chandrasekhar conseguì l'equivalente indiano del diploma di baccalaureato e nell'ultima settimana di luglio si imbarcò su una nave a vapore diretto nella lontana Inghilterra. Era stato ammesso a frequentare l'Università di Cambridge, che ospitava i suoi eroi, R.H. Fowler e Arthur Eddington.

La massa massima

Quei diciotto giorni per mare, durante il viaggio da Madras a Southampton, furono per Chandrasekhar la prima occasione di riflettere sulla fisica senza la distrazione dello studio accademico e degli esami. La solitudine del mare favoriva la riflessione, e i pensieri di Chandrasekhar erano fecondi, tanto che lo avrebbero aiutato a vincere il premio Nobel, ma solo cinquantaquattro anni più tardi e dopo un'aspra battaglia per farli accettare alla comunità astronomica mondiale.

A bordo del vaporetto, Chandrasekhar lasciò che la sua mente tornasse a riflettere sulle nane bianche, il paradosso di Eddington e la soluzione di Fowler. Quest'ultima doveva quasi certamente essere corretta, non ce n'erano altre in vista. Tuttavia, Fowler non aveva sviscerato completamente la questione dell'equilibrio tra pressione di degenerazione e gravità in una nana bianca, né aveva effettuato calcoli relativi alla struttura interna della stella – il

modo in cui la sua densità, la sua pressione e la sua gravità cambiano andando dalla sua superficie al centro. Era una sfida interessante e poteva contribuire a scacciare la noia del lungo viaggio.

Per analizzare la struttura della stella, Chandrasekhar aveva bisogno di conoscere la risposta alla seguente domanda: supponiamo che la materia della nana bianca sia già stata compressa a una certa densità (ad esempio pari a un milione di grammi per centimetro cubo), e comprimiamo la materia (ossia, riduciamone il volume e aumentiamone la densità) di un ulteriore 1%. La materia protesterà contro questa ulteriore compressione aumentando la sua pressione. In quale percentuale aumenterà la sua pressione? I fisici chiamano *indice adiabatico* l'aumento percentuale di pressione derivante da un ulteriore 1% di compressione. In questo libro userò la formulazione più intuitiva di *resistenza alla compressione*, o semplicemente di *resistenza* (questa «resistenza alla compressione» non va confusa con la «resistenza elettrica»; sono concetti completamente differenti).

Chandrasekhar calcolò la resistenza alla compressione esaminando passo dopo passo le conseguenze di un aumento dell'1% della densità nella materia delle nane bianche: la conseguente riduzione delle dimensioni della cella dell'elettrone, la riduzione della sua lunghezza d'onda, l'aumento della sua energia e della sua velocità e infine l'aumento della pressione. Il risultato era chiaro: un aumento dell'1% della densità provocava ⁵⁄₃ di aumento percentuale (1,667%) della pressione. La resistenza della materia delle nane bianche era pertanto di ⁵⁄₃.

Molti decenni prima del viaggio di Chandrasekhar, gli astrofisici avevano calcolato i particolari relativi all'equilibrio tra gravità e pressione all'interno di qualsiasi stella la cui materia presenti una resistenza alla compressione indipendente dalla profondità, ossia una stella la cui pressione e densità aumentino di pari passo man mano che ci si muove verso l'interno, dove un aumento dell'1% della densità si accompagna sempre allo stesso aumento percentuale fisso della pressione. I particolari delle risultanti strutture stellari erano contenuti nel libro di Eddington *The Internal Constitution of the Stars*, che Chandrasekhar custodiva gelosamente a bordo della nave. Perciò, quando scoprì che la materia delle nane bianche presenta una resistenza alla compressione di ⁵⁄₃ indipendentemente dalla sua densità, se ne compiacque. Ora poteva usare direttamente il libro di Eddington per scoprire la struttura interna della stella: il modo in cui la sua densità e pressione cambiavano passando dalla superficie al centro.

Tra le cose che Chandrasekhar scoprì combinando le formule del libro di

Eddington con le proprie, figuravano la densità al centro di Sirio B, 360.000 grammi per centimetro cubo (6 tonnellate per pollice cubo) e la velocità del moto degli elettroni degenere in quella regione, il 57% della velocità della luce.

La velocità dell'elettrone era elevata in modo inquietante. Chandrasekhar, come R.H. Fowler prima di lui, aveva calcolato la resistenza della materia delle nane bianche usando le leggi della meccanica quantistica, ma ignorando gli effetti della relatività. Tuttavia, quando un qualsiasi oggetto si muove quasi alla velocità della luce, anche una particella che obbedisce alle leggi della meccanica quantistica, gli effetti della relatività ristretta devono diventare rilevanti. Al 57% della velocità della luce gli effetti della relatività potrebbero non essere terribilmente grandi, ma una nana bianca più massiva, con la sua maggiore gravità, richiederebbe una pressione al centro molto superiore per sostenersi, e la velocità casuale dei suoi elettroni dovrebbe essere più elevata in misura corrispondente. In una nana bianca di questo tipo, gli effetti della relatività non potrebbero certamente venire ignorati. Pertanto, Chandrasekhar tornò al punto di partenza della sua analisi, il calcolo della resistenza alla compressione relativa alla materia delle nane bianche, ripromettendosi stavolta di inserirvi gli effetti della relatività.

Per far ciò bisognava rendere compatibili le leggi della relatività ristretta con le leggi della meccanica quantistica, una fusione che le grandi menti della fisica teorica stavano appena cominciando a prendere in esame. Da solo sulla sua nave e laureato da poco, Chandrasekhar non era in grado di giungere a una simile fusione. Tuttavia, riuscì a produrre abbastanza da indicare i principali effetti dell'alta velocità degli elettroni.

La meccanica quantistica afferma che quando una materia già densa viene ulteriormente compressa, riducendo ancora un po' lo spazio di movimento di ogni elettrone, la lunghezza d'onda di quest'ultimo deve diminuire e, di conseguenza, l'energia del suo moto degenere deve aumentare. Tuttavia, come capì Chandrasekhar, l'energia aggiuntiva dell'elettrone è di natura diversa a seconda che l'elettrone si muova lentamente rispetto alla luce o a una velocità prossima a essa. Se il moto dell'elettrone è lento, come nella vita quotidiana, un aumento di energia significa un moto più rapido, ossia una maggiore velocità. Se l'elettrone si muove già a una velocità prossima a quella della luce, invece, essa non può aumentare di molto in alcun modo (se lo facesse, supererebbe la velocità della luce!), quindi l'aumento di energia assume un'altra forma, inusuale nella vita quotidiana: l'energia aggiuntiva si trasforma in inerzia, ovvero, accresce la resistenza dell'elettrone a subire acce-

lerazioni – fa comportare l'elettrone come se fosse diventato un po' più pesante. Questi due diversi destini dell'energia aggiuntiva (maggiore velocità o maggiore inerzia) producono aumenti diversi nella pressione dell'elettrone, e quindi, dedusse Chandrasekhar, diversi gradi di resistenza alla compressione: a basse velocità dell'elettrone, una resistenza pari a $5/3$, la stessa che aveva calcolato prima; ad alte velocità, una resistenza pari a $4/3$.

Combinando questa resistenza pari a $4/3$ per la *materia relativisticamente degenere* (materia, cioè, talmente densa che gli elettroni degenere si muovono quasi alla velocità della luce) con le formule indicate nel libro di Eddington, Chandrasekhar dedusse le proprietà delle nane bianche ad alta densità e dalla massa elevata. La risposta era stupefacente: la materia ad alta densità avrebbe avuto difficoltà a resistere alla gravità, una difficoltà tale che *solo se la massa della stella fosse inferiore a 1,4 volte quella del Sole sarebbe possibile controbilanciare la compressione esercitata dalla gravità*. Ciò voleva dire che nessuna nana bianca avrebbe mai potuto avere una massa superiore a 1,4 volte quella del Sole!

Con la sua limitata conoscenza dell'astrofisica, Chandrasekhar era estremamente perplesso circa il significato di questo strano risultato. Egli controllò ripetutamente i suoi calcoli, ma non trovò errori. Così, negli ultimi giorni della traversata scrisse due articoli tecnici destinati a essere pubblicati. In uno descriveva le sue conclusioni sulla struttura delle nane bianche di massa e densità basse come Sirio B. Nell'altro, illustrava brevemente la conclusione cui era giunto secondo cui nessuna nana bianca poteva essere più pesante di 1,4 Soli.

Quando Chandrasekhar arrivò a Cambridge, Fowler si trovava all'estero. A settembre, quando tornò, Chandrasekhar si recò ansioso nel suo ufficio e gli consegnò i due articoli. Fowler approvò il primo e lo inviò al «Philosophical Magazine» perché lo pubblicasse, ma il secondo, quello riguardante la massa massima delle nane bianche, lo sconcertò. Non riusciva a comprendere la prova fornita da Chandrasekhar del fatto che una nana bianca non poteva avere un peso superiore a 1,4 volte quello del Sole; ma in fondo era un fisico più che un astronomo, e così chiese a un suo collega, il famoso astronomo E.A. Milne, di esaminarlo. Quando neanche Milne riuscì a comprendere la prova, Fowler rifiutò di approvarne la pubblicazione.

Chandrasekhar era infastidito. Erano passati tre mesi dal suo arrivo in Inghilterra e Fowler aveva tenuto il suo *paper* nel cassetto per due mesi. L'attesa per la pubblicazione era troppo lunga. Perciò, irritato, Chandrasekhar

abbandonò i tentativi di pubblicare in Inghilterra e spedì il suo articolo all'«Astrophysical Journal» in America.

Dopo qualche settimana arrivò una risposta dall'editor dell'Università di Chicago: l'articolo era stato inviato al fisico americano Carl Eckart per un giudizio. Nell'articolo, Chandrasekhar affermava, senza fornire una spiegazione, il risultato dei suoi calcoli relativistici e quantistici, ossia che la resistenza alla compressione, alle densità ultraelevate, era di $4/3$. Questa resistenza di $4/3$ era essenziale per stabilire il peso limite delle nane bianche. Se la resistenza fosse stata maggiore di $4/3$, le nane bianche avrebbero potuto essere pesanti a volontà – ed Eckart pensava che dovesse essere maggiore. Chandrasekhar si affrettò a spedire una risposta che conteneva una derivazione matematica della resistenza di $4/3$. Leggendo i particolari, Eckart ammise che Chandrasekhar aveva ragione e approvò la pubblicazione dell'articolo. Finalmente, un anno dopo averlo scritto, Chandrasekhar vedeva pubblicato il suo articolo[4]. La risposta della comunità astronomica fu un silenzio assordante. Nessuno sembrava trovarlo di un qualche interesse. Perciò Chandrasekhar, desideroso di conseguire il Ph.D., si rivolse ad argomenti di ricerca più accettabili.

Tre anni più tardi, una volta conseguito il Ph.D., Chandrasekhar si recò in Russia per uno scambio di idee con gli scienziati sovietici. A Leningrado, un giovane astrofisico armeno, Viktor Amazapovich Ambartsumian, gli disse che i fisici di tutto il mondo non avrebbero creduto al suo strano limite relativo alla massa delle nane bianche finché non avesse calcolato, a partire dalle leggi della fisica, la massa di un campione rappresentativo di nane bianche e non avesse dimostrato esplicitamente che erano tutte al di sotto del limite da lui enunciato. Non bastava, sosteneva Ambartsumian, che Chandrasekhar avesse analizzato delle nane bianche con una densità piuttosto bassa e una resistenza di $5/3$ e delle nane bianche con una densità estremamente elevata e una resistenza di $4/3$; occorreva che analizzasse anche un campione considerevole di nane bianche di densità compresa tra i due estremi e dimostrasse che anche esse presentavano, sempre, una massa inferiore a 1,4 volte quella del Sole. Sulla via del ritorno per Cambridge, Chandrasekhar raccolse la sfida di Ambartsumian.

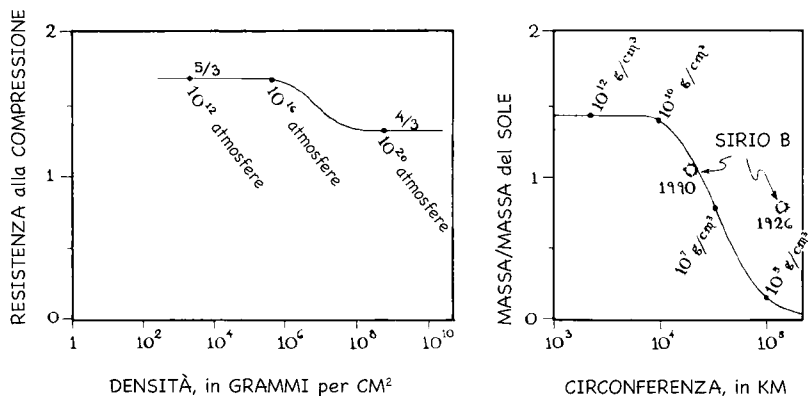
Un elemento fondamentale di cui Chandrasekhar aveva bisogno era l'equazione di stato della materia delle nane bianche per tutta la gamma di densità, da quelle basse a quelle estremamente elevate (per «stato» della materia i fisici intendono la densità e la pressione della materia, o, il che è equivalente,

la sua densità e la resistenza alla compressione, poiché a partire dalla resistenza e dalla densità si poteva calcolare la pressione. Per «equazione di stato» si intende il rapporto tra la resistenza e la densità, ossia la resistenza come una funzione della densità).

Verso la fine del 1934, quando Chandrasekhar raccolse la sfida di Ambartsumian, l'equazione di stato della materia delle nane bianche era nota grazie ai calcoli di Edmund Stoner dell'Università di Leeds, in Inghilterra, e di Wilhelm Anderson dell'Università di Tartu, in Estonia. L'equazione di stato di Stoner-Anderson indicava che quando la densità della materia delle nane bianche viene aumentata sempre più dalla compressione, passando da un regime non relativistico in cui densità e velocità degli elettroni sono basse a uno relativistico in cui la densità è estremamente elevata e la velocità degli elettroni si avvicina a quella della luce, la resistenza della materia alla compressione diminuisce gradatamente da $5/3$ a $4/3$ (parte sinistra della figura 4.3). La resistenza non avrebbe potuto comportarsi in modo più semplice.

Per superare la sfida di Ambartsumian, Chandrasekhar doveva combinare questa equazione di stato (la dipendenza della resistenza dalla densità) con la legge relativa all'equilibrio tra gravità e pressione della stella e ottenere quindi un'*equazione differenziale*[5] che descrivesse la struttura interna della stella, cioè la variazione della sua densità rispetto alla distanza dal centro. Poi doveva risolvere tale equazione differenziale per una dozzina di stelle, o giù di lì, la cui densità al centro assumesse valori diversi, da quelli bassi a quelli estremamente elevati. Solo risolvendo l'equazione differenziale per ogni stella avrebbe potuto conoscere la massa di ognuna di esse e controllare se era inferiore a 1,4 volte quella del Sole.

Per le stelle con una densità al centro bassa o estremamente elevata, che Chandrasekhar aveva studiato a bordo della sua nave, aveva trovato la soluzione dell'equazione differenziale e le strutture stellari che ne derivavano nel libro di Eddington; ma per le stelle di densità intermedia esso non era di aiuto e, malgrado tutti i suoi sforzi, Chandrasekhar non era in grado di dedurre la soluzione utilizzando delle formule matematiche. La matematica era troppo complicata. Non c'era altro da fare che risolvere l'equazione differenziale numericamente, con un calcolatore.

Ma nel 1934 i calcolatori erano molto diversi da quelli degli anni Novanta. Essi somigliavano alle più semplici calcolatrici tascabili. Potevano moltiplicare solo due numeri per volta e l'utilizzatore doveva inserire i numeri manualmente e poi girare una manovella. La manovella metteva in movimento

4.3 – *A sinistra*: l'equazione di stato di Stoner-Anderson relativa alla materia delle nane bianche, ossia, il rapporto tra la densità della materia e la sua resistenza alla compressione. Orizzontalmente è indicata la densità alla quale la materia è stata compressa. Verticalmente è indicata la sua resistenza (l'aumento percentuale di pressione che si accompagna a un aumento dell'1% della densità). Lungo la curva è indicata la pressione della compressione (uguale alla pressione interna), espressa in termini di multipli della pressione dell'atmosfera terrestre.
A destra: le circonferenze (indicate orizzontalmente) e le masse (indicate verticalmente) delle nane bianche calcolate da Chandrasekhar con la calcolatrice meccanica Braunschweiger di Eddington. Lungo la curva è segnata la densità della materia al centro della stella, in grammi per centimetro cubo.

un complicato intrico di leve e ingranaggi che effettuavano la moltiplicazione e fornivano la risposta.

Quei calcolatori erano macchine preziose, ed era molto difficile avervi accesso. Ma Arthur Eddington possedeva una Braunschweiger, all'incirca delle dimensioni di un personal computer da tavolo degli anni Novanta; così Chandrasekhar, che ormai conosceva bene quell'illustre personaggio, chiese a Eddington di prestargliela. All'epoca Eddington era impegnato in una controversia con Milne sulle nane bianche ed era desideroso di vederne illustrata nei dettagli la struttura, e così permise a Chandrasekhar di portarsi la Braunschweiger al Trinity College dove abitava.

I calcoli erano lunghi e noiosi. Ogni sera dopo cena Eddington, che era membro del Trinity College, saliva le scale fino alla stanza di Chandrasekhar per vedere come procedevano e per incoraggiarlo.

Infine, dopo molti giorni, Chandrasekhar terminò. Aveva superato la sfida di Ambartsumian. Aveva calcolato la struttura interna di dieci nane bianche rappresentative e, in base a essa, la massa totale della stella e la sua circonferenza. La massa era sempre inferiore a 1,4 volte quella del Sole come si era fermamente aspettato. Inoltre, quando riportò la massa e la circonferenza delle stelle su un diagramma e «unì i puntini», ottenne un'unica curva uniforme (parte destra della figura 4.3; si veda anche la scheda 4.2) e la massa e la circonferenza di Sirio B e di altre nane bianche conosciute combaciavano moderatamente con tale curva (con le più accurate osservazioni astronomiche moderne la rispondenza alla curva risulta molto maggiore; si osservino nella figura 4.3 i nuovi valori della massa e della circonferenza di Sirio B ottenuti nel 1990). Fiero di tale risultato e prevedendo che gli astronomi di tutto il mondo avrebbero accettato la sua tesi secondo cui le nane bianche non possono avere un peso superiore a 1,4 volte quello del Sole, Chandrasekhar era molto soddisfatto.

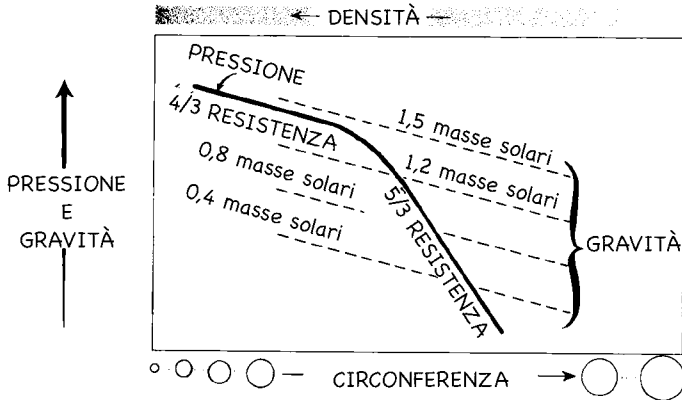
Particolarmente gratificante sarebbe stata l'opportunità di esporre tali risultati alla Royal Astronomical Society a Londra. L'intervento di Chandrasekhar era fissato per venerdì 11 gennaio 1935. Il protocollo prevedeva che il programma dettagliato degli incontri restasse segreto fino all'inizio dei lavori, ma Kay Williams, vicesegretaria della Società e amica di Chandrasekhar, aveva l'abitudine di spedirgli segretamente il programma in anticipo. Giovedì sera, quando ricevette il programma, egli fu sorpreso di scoprire che immediatamente dopo il suo intervento ce ne sarebbe stato uno di Eddington sul tema della «degenerazione relativistica». Chandrasekhar era un po' seccato. Negli ultimi mesi Eddington era venuto a trovarlo almeno una volta alla settimana e a informarsi sul suo lavoro, aveva letto le bozze dei suoi articoli, ma non gli aveva mai detto che stava conducendo delle ricerche per conto suo sullo stesso argomento!

Superando il fastidio, Chandrasekhar scese per la cena. Eddington era in sala, seduto al tavolo dei membri di prestigio, tuttavia, secondo il protocollo, conoscere uno studioso eminente come lui e che per di più aveva espresso interesse verso il suo lavoro non significava avere il diritto di andare a seccarlo con faccende del genere. Quindi Chandrasekhar si sedette altrove e tenne la bocca chiusa.

Dopo la cena, lo stesso Eddington andò da Chandrasekhar e gli disse:

Scheda 4.2
UNA SPIEGAZIONE DELLA MASSA E DELLA CIRCONFERENZA DELLE NANE BIANCHE

Per comprendere qualitativamente perché le nane bianche hanno la massa e la circonferenza indicate nella figura 4.3, si esamini il disegno a fianco. Esso raffigura la pressione e la gravità medie all'interno di una nana bianca (verticalmente) come funzioni della circonferenza della stella (orizzontalmente). Se si comprime la stella in modo da aumentarne la pressione e ridurne la circonferenza (movimento verso sinistra nel disegno), la pressione della stella aumenta nel modo indicato dalla curva a tratto pieno, con un incremento più rapido alle basse densità in cui la resistenza alla compressione è pari a 5/3 e un incremento più lento alle alte densità, dove essa è pari a 4/3. La stessa compressione fa sì che la superficie si muova verso il centro della stella, facendo aumentare la forza di gravità interna nel modo indicato dalle linee tratteggiate. Il tasso di incremento della gravità è analogo a una resistenza di 4/3: vi è un incremento percentuale di 4/3 della forza di gravità per ogni 1% di compressione. Il disegno mostra diverse linee di gravità tratteggiate, una per ogni valore della massa della stella, perché maggiore è la massa della stella, più forte è la sua gravità.
All'interno di ogni stella, ad esempio una stella di massa pari a 1,2 volte il Sole, la gravità e la pressione devono bilanciarsi l'un l'altra. La stella deve pertanto trovarsi all'intersezione della linea di gravità tratteggiata indicata come «1,2 masse solari» con la curva a tratto pieno relativa alla pressione; questa intersezione determina la circonferenza della stella (indicata in basso nel grafico). Se la circonferenza fosse più grande, la linea di gravità tratteggiata della stella si troverebbe al di sopra della curva di pressione a tratto pieno, la gravità supererebbe la pressione e la stella imploderebbe. Se la circonferenza fosse più piccola, la pressione supererebbe la gravità, e la stella esploderebbe.
Le intersezioni delle diverse linee tratteggiate con la curva a tratto pieno corrispondono alla massa e alla circonferenza di equilibrio delle nane bianche, come indicato nella parte destra della figura 4.3. Per una stella di massa piccola (la linea tratteggiata più in basso), la circonferenza all'intersezione è grande. Per una stella di massa più grande (la linea tratteggiata più in alto), la circonferenza è più piccola. Per una stella di massa superiore a 1,4

volte il Sole, non c'è alcuna intersezione, la linea di gravità tratteggiata si trova sempre al di sopra della curva di pressione a tratto pieno, di modo che la gravità supera sempre la pressione, qualunque sia la circonferenza, e obbliga la stella a implodere.

«Ho chiesto a Smart di darti mezz'ora domani, invece dei soliti quindici minuti». Chandrasekhar lo ringraziò e attese che dicesse qualcosa sul proprio intervento, ma Eddington si congedò e se ne andò. L'irritazione di Chandrasekhar si trasformò in apprensione.

La battaglia

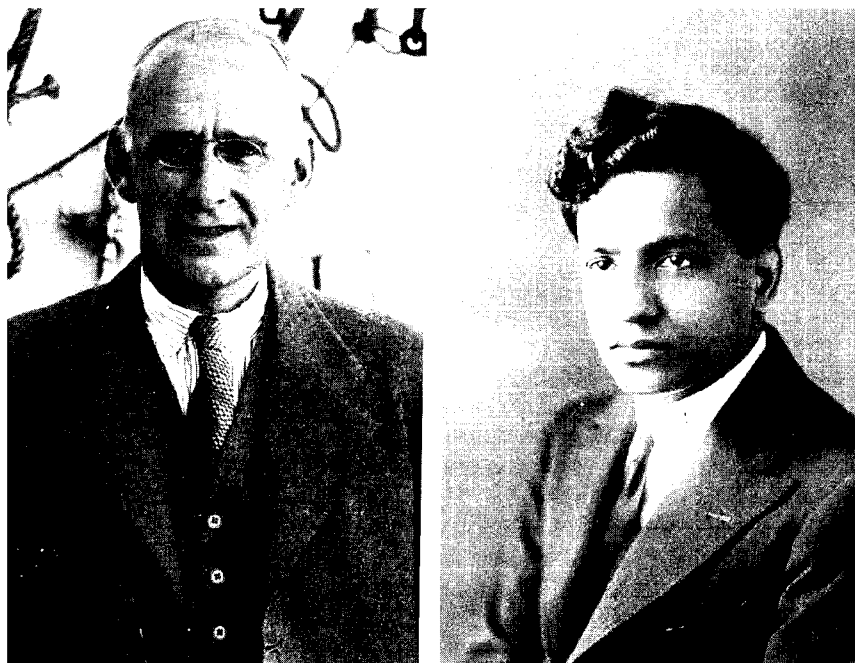
Il mattino seguente Chandrasekhar prese il treno per Londra e un taxi per Burlington House, sede della Royal Astronomical Society. Mentre lui e un amico, Bill McCrea, attendevano l'inizio della sessione, Eddington passò accanto a loro e McCrea, che aveva appena letto il programma, gli chiese: «Professore, cosa dobbiamo intendere per "degenerazione relativistica"?». Per tutta risposta Eddington, rivolto a Chandrasekhar disse: «Questa è una sorpresa per te», e si allontanò, lasciando Chandrasekhar in preda a un'ansia ancora più forte.

Infine, l'incontro ebbe inizio. Il tempo trascorse tra i vari annunci della presidenza e gli interventi di diversi astronomi sui temi più svariati. Finalmente toccava a Chandrasekhar. Controllando il nervosismo fece un'esposizione impeccabile, dando particolare risalto al suo concetto di massa massima delle nane bianche.

Dopo l'educato applauso dei membri della Società, il presidente invitò Eddington a parlare.

Eddington iniziò con calma a ripercorrere la storia della ricerca sulle nane bianche. Poi, acquistando slancio, descrisse le inquietanti implicazioni derivanti dai risultati di Chandrasekhar relativi alla massa massima: nel diagramma di Chandrasekhar, con la massa di una stella indicata verticalmente e la circonferenza orizzontalmente (figura 4.4), vi è un solo modello di massa e circonferenza in cui la gravità può essere controbilanciata dalla pressione non termica (la pressione che rimane dopo che la stella si è raffreddata): quello delle nane bianche. Nella regione a sinistra della curva delle nane bianche di Chandrasekhar (l'area ombreggiata; stelle di circonferenza più piccola) la pressione di degenerazione non termica sopraffà completamente la gravità. La pressione di degenerazione porterà la stella che si trova nell'area ombreggiata a esplodere. Nella regione a destra della curva delle nane bianche (l'area bianca; stelle di circonferenza più grande) la gravità sopraffà completamente la pressione di degenerazione della stella. *Qualsiasi* stella fredda che si trovi in tale regione imploderà immediatamente a causa della compressione gravitazionale.

Il Sole può trovarsi nella regione bianca solo perché attualmente è molto caldo: la sua pressione termica (indotta dal calore) riesce a controbilanciare la sua gravità. Tuttavia, quando infine il Sole si raffredderà, la sua pressione termica scomparirà ed esso non sarà più in grado di sussistere. La gravità lo costringerà a rimpicciolire sempre più comprimendo i suoi elettroni in spazi sempre più ridotti, finché infine non protesteranno con una pressione di degenerazione (pressione non termica) sufficiente ad arrestare il rimpicciolimento. Durante questa «morte» per contrazione, la massa del Sole resterà pressoché costante, ma la sua circonferenza si ridurrà, e quindi si sposterà verso sinistra lungo una linea orizzontale nella figura 4.4, fermandosi infine sulla curva delle nane bianche – la sua tomba. Lì, il Sole, sotto forma di nana bianca, continuerà a risiedere per sempre, raffreddandosi gradualmente e diventando una nana nera, un oggetto scuro e solido più o meno delle dimensioni della Terra, ma un milione di volte più pesante e più denso.

Il destino finale del Sole sembrava abbastanza soddisfacente a Eddington.

A Sinistra: Arthur Stanley Eddington nel 1932. *A destra*: Subrahmanyan Chandrasekhar nel 1934. [A sinistra: per gentile concessione di UPI/Bettmann; a destra: per gentile concessione di S. Chandrasekhar].

Non altrettanto quella di una stella più massiva rispetto al limite scoperto da Chandrasekhar di 1,4 masse solari – ad esempio Sirio, la compagna da 2,3 masse solari di Sirio B. Se Chandrasekhar aveva ragione, non avrebbe mai potuto morire discretamente come il Sole. Quando le radiazioni emesse avranno disperso abbastanza calore perché la stella cominci a raffreddarsi, la sua pressione termica declinerà e la compressione gravitazionale la farà rimpicciolire sempre più. Nel caso di una stella massiva come Sirio, il rimpicciolimento non può essere arrestato dalla pressione di degenerazione non termica. Ciò è indicato chiaramente dalla figura 4.4 in cui l'area ombreggiata non si estende abbastanza in alto da intercettare il percorso che Sirio compie nel suo processo di contrazione. Eddington trovava questa previsione inquietante.

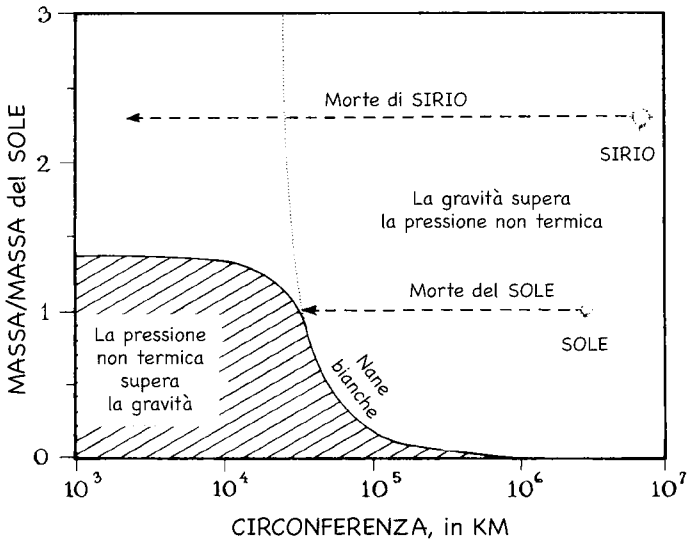
«La stella deve continuare a irradiare e irradiare, e a contrarsi e contrarsi», disse Eddington alla platea, «finché, suppongo, non si riduce a un raggio di

pochi chilometri, quando la gravità diventa abbastanza forte da trattenere la radiazione e la stella può infine trovare pace (nel linguaggio degli anni Novanta, deve trasformarsi in un buco nero). Il dottor Chandrasekhar aveva già ottenuto questo risultato in precedenza, ma lo ha infilato nel suo ultimo *paper*, e mentre ne discutevo con lui mi sentivo portato a concludere che si trattava quasi di una *reductio ad absurdum* della formula della degenerazione relativistica. Diversi fenomeni posso intervenire a salvare la stella, ma desidero una sicurezza maggiore di questa. Penso che debba esservi una legge di natura che impedisca a una stella di comportarsi in questo modo assurdo!».

Quindi Eddington affermò che la prova matematica fornita a riguardo da Chandresekhar non era affidabile perché si basava su una combinazione non abbastanza sofisticata della relatività speciale con la meccanica quantistica. «Non considero questa unione come il frutto di un legittimo matrimonio», disse Eddington. «Sono convinto che [se l'unione viene effettuata correttamente] le correzioni relativistiche vengano compensate in modo tale da tornare alla formula "ordinaria"» (ossia, a una resistenza pari a $5/3$ che permetterebbe alle nane bianche di avere una massa arbitraria e consentirebbe alla pressione di arrestare la contrazione di Sirio sull'ipotetica curva tratteggiata a puntini della figura 4.4). Eddington poi illustrò a grandi linee il modo in cui *egli* riteneva che la relatività speciale e la meccanica quantistica avrebbero dovuto essere unite, un tipo di unione alquanto diverso da quello usato da Chandrasekhar, Stoner e Anderson, un'unione, affermava Eddington, che avrebbe salvato tutte le stelle dal destino di diventare buchi neri.

Chandrasekhar era scioccato. Non si sarebbe mai aspettato un simile attacco al suo lavoro. Perché Eddington non ne aveva discusso con lui prima? Quanto alla sua tesi, Chandrasekhar la trovava speciosa, e quasi certamente errata.

Tuttavia, Eddington era *il* luminare dell'astronomia inglese. Le sue scoperte erano quasi leggendarie. A lui si doveva gran parte delle conoscenze che gli astronomi avevano di stelle normali come il Sole e Sirio, del loro interno, della loro atmosfera e della luce che emettevano; perciò ovviamente, i membri della Società e gli astronomi di tutto il mondo lo ascoltarono con grande rispetto. Chiaramente, se Eddington pensava che l'analisi di Chandrasekhar era sbagliata, doveva essere così.

Al termine della riunione i membri della società andarono uno dopo l'altro a esprimere il proprio rammarico a Chandrasekhar. «Sento che Eddington ha ragione», gli disse Milne.

4.4 – Quando una stella normale come il Sole o Sirio (non Sirio B) comincia a raffreddarsi, deve rimpicciolire, spostandosi verso sinistra in questo diagramma che mette in relazione la massa con la circonferenza. La contrazione del Sole si arresterà quando esso raggiungerà il margine dell'area ombreggiata (la curva delle nane bianche). Lì la pressione di degenerazione controbilancia la compressione gravitazionale. La contrazione di Sirio, invece, non può arrestarsi perché non raggiunge mai il margine dell'area ombreggiata. Si veda la scheda 4.2 per una raffigurazione diversa di queste conclusioni. Se, come affermava Eddington, la resistenza alla compressione della materia delle nane bianche era sempre pari a 5/3, ossia, se la relatività non la riducesse a 4/3 alle alte densità, il grafico della massa rispetto alla circonferenza avrebbe la forma della sottile curva punteggiata e la contrazione di Sirio si arresterebbe lì.

Il giorno dopo, Chandrasekhar cominciò a chiedere aiuto ai fisici suoi amici. A Léon Rosenfeld, a Copenaghen, scrisse: «Se Eddington ha ragione, i miei ultimi quattro mesi di lavoro se ne vanno in fumo. Potrebbe avere ragione? Mi piacerebbe molto conoscere il parere di Bohr» (Niels Bohr era uno dei padri della meccanica quantistica e il più rispettato fisico degli anni Trenta). Rosenfeld rispose due giorni dopo assicurandogli che lui e Bohr erano

convinti che Eddington si sbagliasse e che Chandrasekhar avesse ragione. «Devo dire che la tua lettera mi ha *alquanto* sorpreso», egli scrisse, «perché nessuno si era nemmeno sognato di mettere in dubbio le equazioni [che hai usato per dedurre la resistenza di $4/3$] e le osservazioni di Eddington riportate nella tua lettera sono piuttosto oscure. Perciò penso che faresti meglio a star su col morale e a non lasciarti intimidire tanto dai personaggi illustri». In un'altra lettera scritta lo stesso giorno Rosenfeld aggiunse: «Né Bohr né io riusciamo a trovare alcun significato nelle affermazioni di Eddington».

Ma per gli astronomi la questione non era così chiara all'inizio. Non avevano esperienza nelle faccende della meccanica quantistica e della relatività, perciò l'autorità di Eddington dominò tra loro per diversi anni. Inoltre, Eddington restò fermamente sulle sue posizioni. Era talmente accecato dal suo rifiuto dei buchi neri da avere il giudizio obnubilato. Desiderava così profondamente che esistesse «una legge di natura che impedisca a una stella di comportarsi in questo modo assurdo», che continuò a credere per tutta la vita che *ci fosse* una legge simile, mentre, in realtà, non ce n'è nessuna.

Verso la fine degli anni Trenta gli astronomi, avendo discusso con i loro colleghi fisici, compresero l'errore di Eddington, ma il loro rispetto per gli enormi successi da lui conseguiti in precedenza impedì loro di ammetterlo in pubblico. In un intervento nell'ambito di una conferenza di astronomia a Parigi nel 1939, Eddington attaccò ancora una volta le conclusioni di Chandrasekhar. Dato che Eddington lo attaccava, Chandrasekhar inviò un biglietto a Henry Norris Russell (un famoso astronomo dell'Università di Princeton) che presiedeva la conferenza. Nel biglietto Chandrasekhar chiedeva il permesso di replicare. Russell gli mandò a sua volta un biglietto in cui rispondeva: «Preferirei di no», anche se quello stesso giorno Russell gli aveva detto in privato: «Fuori di qui non crediamo a Eddington».

Visto che i più importanti astronomi del mondo avevano finalmente accettato – almeno alle spalle di Eddington – l'esistenza di una massa massima per le nane bianche come proposto da Chandrasekhar, erano pronti anche ad ammettere che i buchi neri potessero esistere nell'Universo reale? Niente affatto. Se la natura non aveva predisposto alcuna legge contro di essi del tipo desiderato da Eddington, avrebbe senza dubbio escogitato un altro modo: presumibilmente ogni stella massiva emetteva senz'altro abbastanza materia nello spazio interstellare durante la fase di invecchiamento o negli spasimi della morte da ridurre la sua massa a meno di 1,4 masse solari ed entrare tranquillamente nella sua tomba sotto forma di nana bianca. Questa era la tesi sposata dalla maggior parte degli astronomi quando Eddington perse la

sua battaglia ed essi vi aderirono per tutti gli anni Quaranta e Cinquanta, e fino ai primi anni Sessanta.

Chandrasekhar, dal canto suo, era rimasto scottato dalla controversia con Eddington. Come ha poi ricordato quarant'anni dopo: «Avevo l'impressione che gli astronomi, senza eccezione, pensassero che mi sbagliavo. Mi consideravano una specie di Don Chisciotte che cercava di abbattere Eddington. Come potete immaginare, è stata un'esperienza molto scoraggiante per me, quella di trovarmi coinvolto in una controversia con la principale figura dell'astronomia e di vedere il mio lavoro completamente screditato dalla comunità degli astronomi. Mi sono dovuto chiedere cosa fare. Avrei dovuto combattere per tutto il resto della mia vita? In fondo, all'epoca avevo intorno ai venticinque anni. Avevo davanti a me trenta o quarant'anni di lavoro scientifico e semplicemente non mi sembrava produttivo continuare a insistere su qualcosa che ormai era stato fatto. Era molto meglio rivolgere altrove il mio interesse e dedicarmi a qualcos'altro».

Così, nel 1939, Chandrasekhar volse le spalle alle nane bianche e alla morte delle stelle e non vi tornò sopra per i successivi venticinque anni (si veda il capitolo VII).

E cosa ne fu di Eddington? Perché aveva trattato così male Chandrasekhar? A Eddington un simile trattamento potrebbe non essere sembrato affatto cattivo. Zuffe e scontri intellettuali a ruota libera erano per lui uno stile di vita. Aver trattato a quel modo il giovane Chandrasekhar potrebbe aver rappresentato, in qualche modo, una forma di rispetto, un segno del fatto che lo accettava come membro dell'establishment dell'astronomia. In effetti dal loro primo scontro del 1935 alla sua morte nel 1944, Eddington manifestò un affetto personale per Chandrasekhar, e questi, pur se scottato dalla controversia, lo ricambiava.

V. IMPLOSIONE OBBLIGATA

Dove neanche la forza nucleare,
che si supponeva essere la più potente di tutte le forze,
può resistere alla pressione schiacciante della gravità

Zwicky

Negli anni Trenta e Quaranta, molti dei suoi colleghi consideravano Zwicky un irritante buffone. Le generazioni di astronomi future guarderanno a lui come a un genio creativo.

«Al tempo in cui lo conobbi, nel 1933, Fritz era profondamente convinto di avere un canale privilegiato per arrivare alla conoscenza ultima, e che tutti gli altri fossero in errore», dice William Fowler, all'epoca studente al Caltech (il California Institute of Technology), dove Zwicky lavorava come insegnante e ricercatore. Jesse Greenstein, un suo collega del Caltech, dalla fine degli anni Quaranta in poi, ricorda Zwicky come «un genio autoproclamato... Non c'è dubbio che avesse una mente straordinaria. Ma, anche se non lo avrebbe mai ammesso, era anche un po' ignorante e privo di autocontrollo.

«...Insegnava in un corso di fisica al quale si era ammessi a sua discrezione. Se riteneva che una persona fosse sufficientemente devota alle sue idee, allora la ammetteva... Era molto isolato [nella Facoltà di fisica del Caltech, e non era] molto popolare all'interno dell'establishment... Le sue pubblicazioni spesso contenevano violenti attacchi ad altre persone».

Zwicky, un uomo tozzo e arrogante sempre pronto ad accapigliarsi, non esitava a proclamare la sua via privilegiata alla conoscenza ultima, o a reclamizzare le rivelazioni che ne derivavano. Lezione dopo lezione e articolo dopo articolo, durante gli anni Trenta annunciò ai quattro venti il concetto di stella di neutroni – un concetto che lui stesso aveva inventato per spiegare le origini dei fenomeni più energeticamente potenti che gli astronomi avessero osservato, le supernovae e i raggi cosmici. Egli partecipò perfino a un pro-

gramma radiofonico nazionale per far conoscere al pubblico le sue stelle di neutroni. Ma a un attento esame, i suoi articoli non erano convincenti. Contenevano poche prove a sostegno delle sue idee.

Correva voce che Robert Millikan (colui che aveva fatto del Caltech una potenza nell'ambito delle istituzioni scientifiche), quando gli chiesero nel bel mezzo di quel trambusto pubblicitario perché tenesse Zwicky al Caltech, rispose che poteva darsi che proprio alcune delle sue idee più bizzarre fossero giuste. Millikan, al contrario di altri che appartenevano all'establishment scientifico, doveva aver notato qualche indizio del genio intuitivo di Zwicky, un genio che venne ampiamente riconosciuto trentacinque anni più tardi, quando gli astronomi impegnati nelle osservazioni scoprirono in cielo delle autentiche stelle di neutroni e verificarono alcune delle stravaganti affermazioni di Zwicky a riguardo.

Fritz Zwicky a una riunione di scienziati al Caltech nel 1931. Nella foto sono presenti anche Richard Tolman (che sarà una figura importante nel prosieguo di questo capitolo), Robert Millikan e Albert Einstein. [Per gentile concessione di Archives, California Institute of Technology].

ZWICKY MILLIKAN EINSTEIN TOLMAN

Tra le asserzioni di Zwicky, la più rilevante ai fini di questo libro è quella sul ruolo delle stelle di neutroni in quanto cadaveri stellari. Come vedremo, una stella normale troppo massiva per morire come una nana bianca può invece morire diventando una stella di neutroni. Se *tutte* le stelle massive morissero in quel modo, l'Universo verrebbe salvato dalla forma più bizzarra di morte stellare che sia stata ipotizzata: quella dei buchi neri. Se le stelle leggere diventassero nane bianche e quelle pesanti stelle di neutroni, la natura non avrebbe modo di creare buchi neri. Einstein e Eddington, e la maggior parte dei fisici e degli astronomi della loro epoca, avrebbero tirato un sospiro di sollievo.

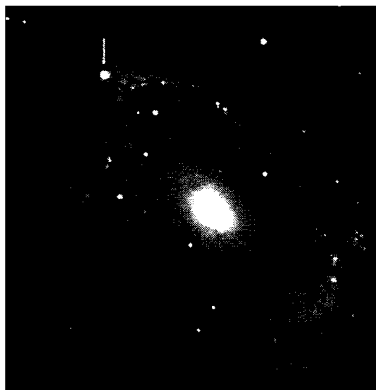
Zwicky era stato portato al Caltech nel 1925 da Millikan. Questi si aspettava che egli si dedicasse ala ricerca teorica sulle strutture quantistiche degli atomi e dei cristalli, ma verso la fine degli anni Venti e nei primi anni Trenta Zwicky venne attratto sempre più dall'astrofisica. Era difficile non restare ammaliati dall'Universo astronomico se si lavorava a Pasadena, dove oltre al Caltech aveva sede anche l'osservatorio di Mount Wilson, che possedeva il telescopio più grande del mondo, un riflettore di 2,5 metri di diametro.

Nel 1931 Zwicky entrò in contatto con Walter Baade, da poco giunto a Mount Wilson da Amburgo e Göttingen, un astronomo che aveva compiuto osservazioni fenomenali. Baade e Zwicky avevano un comune retroterra culturale. Baade era tedesco e Zwicky svizzero, e il tedesco era la lingua madre di entrambi. Inoltre, nutrivano entrambi rispetto per la brillante intelligenza dell'altro. Ma ciò che avevano in comune finiva qui. Il temperamento di Baade era diverso da quello di Zwicky. Egli era riservato, orgoglioso, difficile da conoscere, ben informato in generale, e tollerante verso le particolarità dei suoi colleghi. Zwicky avrebbe messo alla prova la tolleranza di Baade negli anni successivi finché, durante la Seconda Guerra Mondiale, non si separarono violentemente. «Zwicky chiamò Baade nazista, cosa che lui non era, e Baade disse che temeva che Zwicky volesse ucciderlo. Divennero una coppia pericolosa da mettere nella stessa stanza», ricorda Jesse Greenstein.

Nel 1932 e nel 1933, a Pasadena, Zwicky e Baade vennero spesso visti discutere animatamente in tedesco delle stelle chiamate «novae», che si accendono all'improvviso e brillano diecimila volte più luminosamente di prima, e poi, dopo circa un mese, si affievoliscono di nuovo tornando alla normalità. Baade, con la sua conoscenza enciclopedica dell'astronomia, era a conoscenza di prove sperimentali dell'esistenza, oltre a queste novae «ordinarie», di rare e inusuali novae superluminose. All'inizio gli astronomi non avevano sospettato che queste novae fossero superluminose, poiché ai loro telescopi

la loro luminosità appariva grosso modo uguale a quella delle novae ordinarie. Tuttavia, esse si trovavano in nebulose («nubi» brillanti) particolari; e negli anni Venti le osservazioni effettuate a Mount Wilson e altrove cominciarono a convincere gli astronomi che quelle nebulose non erano semplici nubi di gas della Via Lattea, come si credeva, ma galassie a pieno titolo, giganteschi assembramenti di quasi 10^{12} (mille miliardi) stelle, estremamente lontane dalla nostra galassia. Le rare novae osservate in quelle galassie, dato che si trovavano a una distanza tanto maggiore rispetto alle comuni novae della nostra galassia, ma viste dalla Terra sembravano avere la stessa luminosità, dovevano essere di per sé molto più luminose.

Baade raccolse tutti i dati pubblicati sulle osservazioni che riuscì a reperire su ognuna delle sei novae superluminose che gli astronomi avevano visto dall'inizio del secolo. Egli combinò questi dati con tutte le informazioni tratte dalle osservazioni che fu in grado di ottenere sulle distanze relative alle galassie in cui esse si trovavano, e in tal modo calcolò la quantità di luce emessa dalle novae superluminose. Le sue conclusioni erano sbalorditive: quando si accendevano, le novae superluminose erano 10^8 (cento milioni) volte più luminose del nostro Sole!

La galassia NGC 4725 nella costellazione Chioma di Berenice. A sinistra: fotografata il 10 maggio 1940 prima dell'esplosione di una supernova. A destra: il 2 gennaio 1941 durante l'esplosione della supernova. La linea bianca indica la supernova alla periferia della galassia. Oggi sappiamo che tale galassia si trova a 30 milioni di anni luce dalla Terra e che contiene 3×10^{11} stelle (un terzo di mille miliardi). [Per gentile concessione del California Institute of Technology].

Oggi sappiamo, in gran parte grazie al lavoro svolto nel 1952 dallo stesso Baade, che negli anni Trenta le distanze erano sottostimate quasi di un fattore 10, e che di conseguenza[1] le novae superluminose sono 10^{10} (dieci miliardi) volte più luminose del nostro Sole.

Zwicky, amante delle cose estreme, era affascinato da queste novae superluminose. Lui e Baade ne discussero all'infinito e coniarono per esse il nome di *supernovae*. Ogni supernova, essi ritenevano (correttamente), era prodotta dall'esplosione di una stella normale. E l'esplosione produceva un calore tale, ipotizzavano (stavolta erroneamente), che irradiava molta più energia sotto forma di luce ultravioletta e raggi X che non di luce comune. Poiché la luce ultravioletta e i raggi X non possono penetrare nell'atmosfera terrestre, era impossibile misurare esattamente quanta energia contenevano. Tuttavia, si poteva tentare di stimarne l'energia a partire dallo spettro della luce osservata e in base alle leggi della fisica che governano il gas incandescente della supernova al momento dell'esplosione.

Combinando la conoscenza che Baade aveva delle osservazioni e delle novae comuni con le nozioni di fisica teorica di Zwicky, i due conclusero (erroneamente) che la radiazione ultravioletta e i raggi X di una supernova dovevano trasportare diecimila o forse dieci milioni di volte più energia della luce visibile. Zwicky, con il suo amore per gli estremi, si convinse rapidamente che il fattore più grande, dieci milioni, era corretto e lo menzionò con entusiasmo.

Questo fattore (erroneo) di dieci milioni significava che nel corso dei molti giorni in cui era al massimo della sua luminosità la supernova emetteva una quantità enorme di energia. Grosso modo cento volte più di quella irradiata dal nostro Sole sotto forma di calore e luce nel corso di tutti i suoi dieci miliardi di anni di vita. Quasi l'energia che si otterrebbe se si potesse convertire un decimo della massa del nostro Sole in energia luminosa pura!

Grazie a decenni di studi successivi basati sulle osservazioni delle supernovae – molti dei quali realizzati dallo stesso Zwicky – oggi sappiamo che la stima di Baade e Zwicky dell'energia di una supernova non era molto lontana dal vero. Tuttavia, sappiamo anche che il loro calcolo di questa energia presentava gravi difetti: quasi tutta l'energia emessa viene trasportata da particelle chiamate neutrini e non dai raggi X o dalla luce ultravioletta come essi pensavano. Baade e Zwicky trovarono la risposta giusta per pura fortuna.

Quale poteva essere l'origine dell'enorme energia della supernova? Per spiegarla, Zwicky inventò la stella di neutroni.

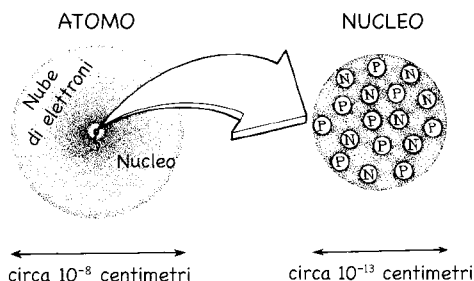
Scheda 5.1
LE STRUTTURE INTERNE DEGLI ATOMI

Un atomo consiste in una nuvola di elettroni che circonda un nucleo centrale massiccio. La nube di elettroni ha all'incirca le dimensioni di 10^{-8} centimetri (circa un milionesimo del diametro di un capello umano) e il nucleo, al centro, è centomila volte più piccolo, grosso modo 10^{-13} centimetri; si veda il diagramma sottostante. Se si ingrandisse la nube di elettroni fino a portarla alle dimensioni della Terra, il nucleo sarebbe grande come un campo di calcio. Malgrado le sue dimensioni minuscole, il nucleo è molte migliaia di volte più pesante della rarefatta nube di elettroni.
Gli elettroni, che hanno carica negativa, sono mantenuti nella loro nube dall'attrazione elettrica del nucleo, che ha carica positiva, ma non cadono dentro il nucleo per la stessa ragione per cui una nana bianca non implode. Una legge della meccanica quantistica chiamata «principio di esclusione di Pauli» impedisce a più di due elettroni di occupare la stessa regione dello spazio allo stesso tempo (due possono farlo purché abbiano «spin» opposti, una sottigliezza ignorata nel capitolo IV). Gli elettroni della nube vengono pertanto accoppiati insieme in celle dette «orbitali». Ogni coppia di elettroni,

Zwicky si interessava a tutte le branche della fisica e dell'astronomia e si considerava un filosofo. Egli cercava di collegare tra loro tutti i fenomeni che incontrava in quella che in seguito chiamò una «maniera morfologica». Nel 1932 il campo più popolare della fisica e dell'astronomia era la *fisica nucleare*, lo studio dei nuclei degli atomi. Da lì Zwicky estrasse l'elemento chiave per la sua idea della stella di neutroni: il concetto di *neutrone*.

Poiché il neutrone sarà molto importante in questo e nel prossimo capitolo, abbandonerò brevemente Zwicky e la sua stella di neutroni per descrivere la scoperta del neutrone e il rapporto che i neutroni hanno con la struttura degli atomi.

Dopo aver formulato le «nuove» leggi della meccanica quantistica nel 1926 (capitolo IV), i fisici passarono i cinque anni seguenti a usare quelle leggi per esplorare il regno dell'estremamente piccolo. Essi svelarono i misteri dell'atomo (scheda 5.1) e di materiali come le molecole, i metalli, i cri-

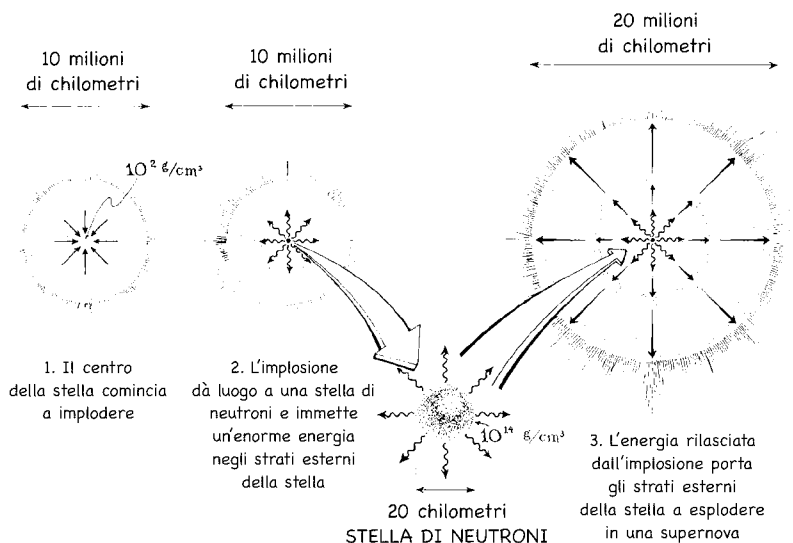
per protesta contro il confinamento nella sua cella ridotta, compie movimenti «claustrofobici», erratici, ad alta velocità, come gli elettroni di una nana bianca (capitolo IV). Questi movimenti danno luogo alla «pressione di degenerazione degli elettroni» che controbilancia l'attrazione elettrica del nucleo. Quindi, si può pensare l'atomo come una minuscola nana bianca, con una forza elettrica, anziché gravitazionale, che attira gli elettroni verso l'interno e una pressione di degenerazione degli elettroni che li spinge verso l'esterno. La parte destra del diagramma raffigura la struttura del nucleo atomico così come illustrato nel testo; si tratta di un minuscolo grappolo di protoni e neutroni tenuti assieme dalla forza nucleare.

stalli e la materia delle nane bianche, che sono composti di atomi. Poi, nel 1931, i fisici rivolsero la loro attenzione al centro dell'atomo e ai nuclei atomici che vi si trovano.

La natura del nucleo atomico era un grande mistero. La maggior parte dei fisici pensava fosse costituito da una manciata di elettroni e da un numero doppio di protoni, legati assieme in qualche modo che non si era ancora ben compreso. Ma Ernest Rutherford, a Cambridge, aveva un'ipotesi diversa: che si trattasse invece di protoni e neutroni. L'esistenza dei protoni era già nota. La fisica li studiava da decenni negli esperimenti e si sapeva che erano circa duemila volte più pesanti degli elettroni e che avevano una carica elettrica positiva. I neutroni erano sconosciuti. Rutherford doveva ipotizzare l'esistenza dei neutroni affinché le leggi della meccanica quantistica potessero spiegare correttamente il nucleo. Una spiegazione corretta richiedeva tre aspetti: 1) ogni neutrone deve avere circa la stessa massa di

un protone e non avere carica elettrica; 2) ogni nucleo deve contenere all'incirca lo stesso numero di neutroni e di protoni; 3) tutti i neutroni e i protoni devono essere tenuti saldamente insieme nei loro ristretti nuclei da un nuovo tipo di forza, né elettrica né gravitazionale – una forza chiamata, ovviamente, *forza nucleare* (detta anche la *forza forte*). I neutroni e i protoni avrebbero reagito al loro confinamento nel nucleo con movimenti claustrofobici, erratici, ad alta velocità; questi movimenti avrebbero prodotto una pressione di degenerazione, e tale pressione avrebbe controbilanciato la forza nucleare, mantenendo il nucleo stabilmente alle sue dimensioni pari a circa 10^{-13} centimetri.

Nel 1931 e agli inizi del 1932 i fisici sperimentali gareggiavano aspramente tra loro per verificare questa descrizione del nucleo. Il metodo era quello di cercare di espellere qualcuno dei neutroni ipotizzati da Rutherford fuori del nucleo atomico bombardando quest'ultimo con raggi ad alta energia. La competizione fu vinta nel febbraio del 1932 da un membro dell'équipe sperimentale dello stesso Rutherford, James Chadwick. Il bombardamento di Chadwick ebbe successo, i neutroni uscirono a profusione e avevano esattamente le proprietà ipotizzate da Rutherford. La scoperta venne annunciata con gran risalto dai giornali di tutto il mondo e naturalmente attirò l'attenzione di Zwicky.

Il neutrone entrò in scena lo stesso anno in cui Baade e Zwicky si affannavano a cercare di comprendere le supernovae. Il neutrone era esattamente ciò di cui avevano bisogno, riteneva Zwicky. Forse, egli ipotizzava, si poteva far implodere il centro di una stella normale, della densità, ad esempio, di cento grammi per centimetro cubo, fino a raggiungere una densità simile a quella di un nucleo atomico, 10^{14} (centomila miliardi) grammi per centimetro cubo; e forse la materia in quel centro della stella così compresso si sarebbe potuta trasformare in un «gas» di neutroni – una «stella di neutroni», la chiamò Zwicky. In tal caso, calcolò Zwicky (correttamente, in questo caso) l'intensa gravità che si sarebbe venuta a creare avrebbe legato insieme il centro compresso così strettamente che, oltre alla sua circonferenza, si sarebbe ridotta anche la sua massa. La massa del centro della stella ora sarebbe stata inferiore del 10% rispetto a quella prima dell'implosione. Dove andava a finire il 10% mancante della massa del centro stellare? In energia esplosiva, ipotizzò Zwicky (correttamente, anche stavolta; si veda la figura 5.1 e la scheda 5.2).

Se, come Zwicky riteneva (correttamente), la massa del centro stellare compresso era all'incirca pari a quella del Sole, il 10% di essa che viene con-

5.1 – L'ipotesi di Fritz Zwicky sul meccanismo che scatena l'esplosione delle supernovae: l'energia esplosiva della supernova deriva dall'implosione del centro di una stella di densità normale che si trasforma in una stella di neutroni.

vertito in energia esplosiva, quando il centro diventa una stella di neutroni, produrrebbe 10^{46} joules, il che si avvicina all'energia che Zwicky pensava fosse necessaria per accendere una supernova. L'energia esplosiva avrebbe potuto riscaldare gli strati esterni della stella fino a una temperatura enorme e farli esplodere scagliandoli nello spazio interstellare (figura 5.1); e quando la stella esplodeva, la sua elevata temperatura avrebbe potuto farla risplendere luminosamente proprio come le supernovae che lui e Baade avevano individuato.

Zwicky non sapeva cosa potesse innescare l'implosione del centro della stella e convertirlo in una stella di neutroni, né come avrebbe potuto comportarsi se fosse imploso, e pertanto non poteva stimare quanto sarebbe durata l'implosione (era una lenta contrazione o una rapidissima implosione?).

Dalle scoperte realizzate negli anni Sessanta e in quelli successivi, che hanno fatto luce su tutti gli aspetti, è risultato che il centro delle stelle implode con violenza; la sua intensa gravità lo porta a implodere da dimensioni

Scheda 5.2
L'EQUIVALENZA DI MASSA ED ENERGIA

La massa, secondo le leggi della relatività ristretta di Einstein, è solo una forma molto compatta di energia. È possibile, anche se *come* non è un aspetto banale, convertire qualsiasi massa, anche quella di una persona, in energia esplosiva. La quantità di energia che deriva da questa conversione è enorme. Il processo è descritto dalla famosa formula di Einstein $E = mc^2$, in cui E è l'energia esplosiva, m è la massa che viene convertita in energia, e $c = 2{,}99792 \times 10^8$ metri al secondo è la velocità della luce. A partire dai 75 chilogrammi di massa tipici di una persona, questa formula prevede un'energia esplosiva pari a 7×10^{18} joules, ossia trenta volte più dell'energia delle più potenti bombe all'idrogeno che siano mai state fatte esplodere.
La conversione della massa in calore o nell'energia cinetica di un'esplosione è alla base della spiegazione di Zwicky delle supernovae (figura 5.1), della combustione nucleare che mantiene caldo il Sole (si veda più avanti in questo capitolo) e delle esplosioni nucleari (si veda il capitolo successivo).

pari quasi a quelle della Terra a una circonferenza di cento chilometri in meno di dieci secondi.

Zwicky inoltre non comprendeva nei dettagli come l'energia derivante dalla contrazione del centro stellare potesse dar luogo all'esplosione di una suepernova, o perché i detriti dell'esplosione brillassero molto intensamente per pochi giorni e restassero abbastanza luminosi per pochi mesi, invece che per pochi secondi, o ore, o anni. Tuttavia, egli sapeva, o credeva di sapere, che l'energia rilasciata dalla formazione di una stella di neutroni era del quantitativo giusto, e ciò dal suo punto di vista era sufficiente.

Zwicky non si accontentava di spiegare le supernovae, voleva spiegare qualunque cosa nell'Universo. Fra tutti gli aspetti inspiegati, quello cui si prestava più attenzione al Caltech nel 1932-1933 erano i raggi cosmici, le particelle ad alta velocità che bombardano la Terra dallo spazio. Al Caltech lavoravano Robert Millikan, il principale studioso a livello mondiale dei raggi cosmici, che aveva battezzato in questo modo, e Carl Anderson, il quale aveva scoperto che alcune particelle dei raggi cosmici erano fatte di *antimateria*[2].

Zwicky, con la sua passione per gli estremi, si convinse (correttamente, a quanto pare) del fatto che la maggior parte dei raggi cosmici provenisse dal di fuori del nostro Sistema Solare; che (erroneamente) la maggior parte provenisse dal di fuori della Via Lattea – in realtà, dalle regioni più distanti dell'Universo – e che (grosso modo correttamente) l'energia totale trasportata da tutti i raggi cosmici dell'Universo fosse all'incirca pari all'energia totale rilasciata dalle supernovae in tutto l'Universo. La conclusione per Zwicky era ovvia (e forse corretta[3]): i raggi cosmici sono prodotti dalle esplosioni delle supernovae.

Era la fine del 1933 quando Zwicky si convinse di queste connessioni tra supernovae, neutroni e raggi cosmici. Dato che la conoscenza enciclopedica delle osservazioni astronomiche di Baade era stata un elemento fondamentale per tali connessioni, e poiché molti dei calcoli e dei ragionamenti di Zwicky si erano sviluppati durante scambi verbali tra lui e Baade, i due concordarono di illustrare insieme il loro lavoro in un incontro dell'American Physical Society presso la Stanford University, a un giorno di viaggio da Pasadena lungo la costa. L'abstract del loro intervento, pubblicato sul numero del 15 gennaio 1934 della «Physical Review», riportato nella figura 5.2, è uno dei documenti più preveggenti della storia della fisica e dell'astronomia.

Esso afferma inequivocabilmente l'esistenza delle supernovae in quanto classe distinta di oggetti astronomici, anche se i dati necessari per dimostrare in modo certo che esse erano diverse dalla novae ordinarie sarebbero stati prodotti da Baade e Zwicky solo quattro anni più tardi, nel 1938. Esso introduce per la prima volta il nome di «supernovae» per tali oggetti, e inoltre stima correttamente l'energia totale rilasciata in una supernova. Esso suggerisce che i raggi cosmici siano prodotti dalle supernovae, un'ipotesi ritenuta ancora plausibile nel 1993, ma non dimostrata in modo inconfutabile (si veda la nota 3 di questo capitolo). L'articolo inventa anche il concetto di una stella fatta di neutroni, concetto che sarebbe stato generalmente accolto come teoricamente ammissibile solo nel 1939, e che non sarebbe stato verificato tramite osservazione fino al 1968. Esso conia per questo concetto il nome di *stella di neutroni*. E ipotizza «con tutte le riserve» (una precisazione probabilmente inserita dal prudente Baade) che le supernovae vengano prodotte dalla trasformazione delle stelle normali in stelle di neutroni, un concetto la cui ammissibilità teorica sarebbe stata dimostrata solo nei primi anni Sessanta e confermata dall'osservazione solo alla fine di tale decennio con la scoperta delle pulsar (stelle di neutroni rotanti e dotate di campo magnetico) dentro il gas esplosivo di antiche supernovae.

Gli astronomi negli anni Trenta accolsero entusiasticamente il concetto di supernova di Baade e Zwicky, ma trattarono le idee di Zwicky sulle stelle di neutroni e i raggi cosmici con un certo disprezzo. «Troppo speculative», fu il commento generale. «Basate su calcoli inaffidabili», si sarebbe potuto aggiungere, in modo abbastanza corretto. Niente negli scritti o nelle parole di Zwicky forniva più di un flebile indizio a sostegno delle sue idee. In effetti, dallo studio approfondito dei testi di Zwicky, mi sembra chiaro che egli non conoscesse le leggi della fisica abbastanza bene da essere in grado di dimostrare la fondatezza delle sue idee. Tornerò sull'argomento nel prosieguo di questo capitolo.

Alcuni concetti nella scienza appaiono così ovvi a posteriori che è sorprendente come nessuno se ne fosse accorto prima. Tale era il caso della connessione tra stelle di neutroni e buchi neri. Zwicky avrebbe potuto cominciare a stabilire questa connessione nel 1933, ma non lo fece; sarebbe avvenuto su base sperimentale sei anni più tardi e, in modo definitivo, un quarto di secolo dopo. Alla tortuosa via che avrebbe infine fatto sbattere il naso ai fisici su questa connessione è dedicata gran parte del resto di questo capitolo.

5.2 – Abstract dell'intervento sulle supernovae, le stelle di neutroni e i raggi cosmici tenuto da Walter Baade e Fritz Zwicky all'Università di Stanford nel dicembre del 1933.

JANUARY 15, 1934 PHYSICAL REVIEW VOLUME 45

Proceedings
of the
American Physical Society

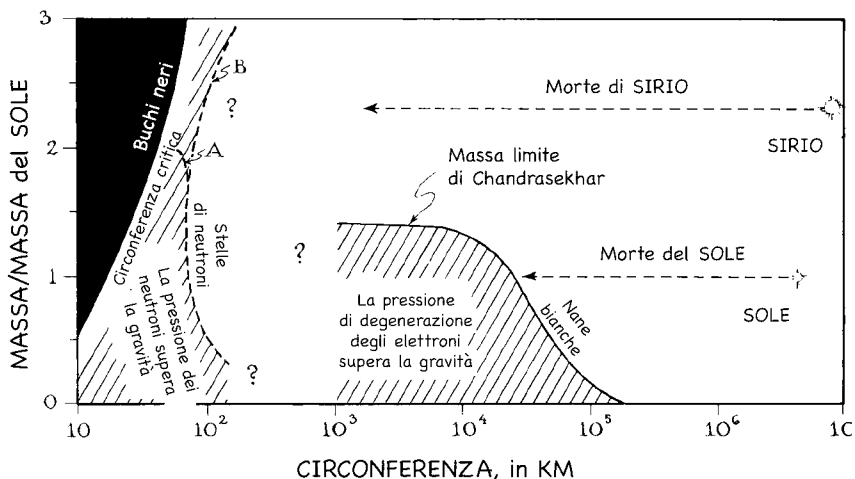
MINUTES OF THE STANFORD MEETING, DECEMBER 15–16, 1933

38. Supernovae and Cosmic Rays. W. BAADE, *Mt. Wilson Observatory*, AND F. ZWICKY, *California Institute of Technology*.—Supernovae flare up in every stellar system (nebula) once in several centuries. The lifetime of a supernova is about twenty days and its absolute brightness at maximum may be as high as $M_{vis} = -14^M$. The visible radiation L_v of a supernova is about 10^8 times the radiation of our sun, that is, $L_v = 3.78 \times 10^{41}$ ergs/sec. Calculations indicate that the total radiation, visible and invisible, is of the order $L_\tau = 10^7 L_v = 3.78 \times 10^{48}$ ergs/sec. The supernova therefore emits during its life a total energy $E_\tau \geq 10^5 L_\tau = 3.78 \times 10^{53}$ ergs. If supernovae initially are quite ordinary stars of mass $M < 10^{34}$ g, E_τ/c^2 is of the same order as M itself. In the *supernova* process *mass in bulk is annihilated*. In addition the hypothesis suggests itself that *cosmic rays are produced by supernovae*. Assuming that in every nebula one supernova occurs every thousand years, the intensity of the cosmic rays to be observed on the earth should be of the order $\sigma = 2 \times 10^{-3}$ erg/cm^2 sec. The observational values are about $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ erg/cm^2 sec. (Millikan, Regener). With all reserve we advance the view that supernovae represent the transitions from ordinary stars into *neutron stars*, which in their final stages consist of extremely closely packed neutrons.

Per apprezzare la storia di come i fisici siano arrivati a riconoscere la connessione stella di neutroni/buco nero, può essere utile sapere prima qualcosa in proposito. Ecco quindi la seguente digressione.

Qual è il destino delle stelle quando muoiono? Il capitolo IV ha già fornito una risposta parziale, inserita nella parte destra della figura 5.3 (che è identica alla figura 4.4). La risposta dipende dal fatto che la stella abbia o meno una massa superiore a 1,4 masse solari (la *massa limite* di Chandrasekhar).

Se la stella è meno massiva del limite di Chandrasekhar, ad esempio se la stella è il Sole stesso, alla fine della sua vita essa segue il cammino indicato come «morte del Sole» nella figura 5.3. Irradiando luce nello spazio, esso si raffredda e perde pressione termica (indotta dal calore). A causa della minore pressione non è più in grado di resistere all'attrazione verso l'interno della sua stessa gravità, che lo costringe a rimpicciolire. Rimpicciolendo, esso si sposta verso sinistra nella figura 5.3, verso circonferenze più piccole pur restando sempre alla stessa altezza poiché la sua massa è immutata (si osservi che nella figura la massa è indicata verticalmente dal basso verso l'alto, e la circonferenza orizzontalmente da sinistra a destra). E rimpicciolendo, la stella comprime gli elettroni al suo interno in celle sempre più piccole finché infine gli elettroni non protestano con una pressione di degenerazione così forte che la stella non può più rimpicciolire. La pressione di degenerazione controbilancia l'attrazione verso l'interno esercitata dalla gravità della stella, obbligando quest'ultima ad adagiarsi nella tomba sotto forma di nana bianca lungo la curva di confine (la curva delle nane bianche) tra la regione bianca della figura 5.3 e quella ombreggiata. Se la stella rimpicciolisse ulteriormente (ossia, si spostasse verso sinistra dalla curva delle nane bianche nella regione ombreggiata), la pressione di degenerazione degli elettroni aumenterebbe e farebbe di nuovo espandere la stella riportandola sulla curva delle nane bianche. Se la stella si espandesse fino a entrare nella regione bianca, la pressione di degenerazione dei suoi elettroni diminuirebbe permettendo alla gravità di ridurla di nuovo riportandola sulla curva delle nane bianche. Perciò, la stella non ha altra scelta se non quella di restare per sempre sulla curva dove la gravità e la pressione si bilanciano perfettamente, raffreddandosi gradualmente e trasformandosi in una nana nera, un corpo solido freddo, scuro, all'incirca delle dimensioni della Terra ma con la massa del Sole.

Se la stella è più massiva rispetto alla massa limite di 1,4 masse solari di Chandrasekhar, ad esempio se è Sirio, alla fine della sua vita seguirà il cammino indicato come «morte di Sirio». Poiché essa emette radiazioni, si raffredda e rimpicciolisce, spostandosi verso sinistra lungo questo sentiero che

5.3 – Il destino ultimo di una stella di massa superiore al limite di 1,4 masse solari di Chandrasekhar dipende da quanto possono essere massive le stelle di neutroni. Se possono essere arbitrariamente massive (curva B), una stella come Sirio, quando muore, può solo implodere fino a formare una stella di neutroni; non può dare luogo a un buco nero. Se esiste un limite massimo alla massa che può avere una stella di neutroni (come nella curva A), una stella massiva morente non può diventare né una nana bianca né una stella di neutroni e, almeno che non esistano altri cimiteri disponibili, diventerà un buco nero.

conduce a circonferenze sempre più piccole, i suoi elettroni vengono compressi in celle sempre più piccole; essi pertanto protestano con una crescente pressione di degenerazione, ma protestano invano. A causa della sua grande massa, la gravità della stella è abbastanza forte da schiacciare qualsiasi protesta degli elettroni. Questi ultimi non possono produrre abbastanza pressione di degenerazione da controbilanciare la gravità della stella[4]; la stella deve, per usare le parole di Arthur Eddington, «continuare a irradiare e irradiare, e a contrarsi e contrarsi, finché, suppongo, non si riduce a un raggio di pochi chilometri, quando la gravità diventa abbastanza forte da trattenere la radiazione e la stella può infine trovare pace».

Oppure quello sarebbe il suo destino se non fosse una stella di neutroni. Se Zwicky aveva ragione ad affermare la possibile esistenza delle stelle di

neutroni, esse devono essere più o meno analoghe alle nane bianche, ma la loro pressione interna sarebbe prodotta dai neutroni invece che dagli elettroni. Ciò significa che deve esserci una curva delle stelle di neutroni nella figura 5.3 analoga alla curva delle nane bianche, ma di circonferenza (indicata lungo l'asse orizzontale) grosso modo pari a un centinaio anziché a decine di migliaia di chilometri. Su questa curva, la pressione dei neutroni bilancerebbe perfettamente la gravità, e la stella di neutroni potrebbe restarvi per sempre.

Supponiamo che la curva delle stelle di neutroni si estenda verso l'alto nella figura 5.3 verso masse di grandi dimensioni; ossia, supponiamo che abbia la forma indicata con B nella figura.

In tal caso, Sirio, quando muore, *non può* dar luogo a un buco nero. Sirio invece, rimpicciolirà fino a incontrare la curva delle stelle di neutroni e poi non potrà più ridursi. Se tentasse di farlo ulteriormente (ovvero si muovesse verso sinistra, spostandosi dalla curva delle stelle di neutroni verso la regione ombreggiata), i neutroni al suo interno protesterebbero contro la compressione cui vengono sottoposti; essi produrrebbero pertanto una maggiore pressione (in parte dovuta alla degenerazione, ossia alla «claustrofobia», e in parte alla forza nucleare), e la pressione diventerebbe abbastanza grande da superare la gravità e riportare la stella indietro. Se la stella tentasse di riespandersi nella regione bianca, la pressione dei neutroni diminuirebbe abbastanza da lasciar prevalere la gravità e la sua attrazione verso l'interno. Pertanto Sirio non avrà altra scelta se non quella di stabilirsi sulla curva delle stelle di neutroni e restarvi per sempre, raffreddandosi gradualmente e trasformandosi in una solida, fredda, nera stella di neutroni.

Supponiamo invece che la curva delle stelle di neutroni non si estenda verso l'alto nella figura 5.3 verso masse di grandi dimensioni, ma si pieghi nel modo dell'ipotetica curva indicata con A. Ciò significa che esiste una massa massima che ogni stella di neutroni può raggiungere, analoga alla massa limite di 1,4 masse solari di Chandrasekhar per le nane bianche. Come per queste ultime, anche per le stelle di neutroni l'esistenza di una massa massima rappresenterebbe un fatto di importanza decisiva: in una stella di massa superiore al massimo, la gravità sopraffarebbe del tutto la pressione dei neutroni. Pertanto, quando una stella così massiva muore, deve emettere abbastanza massa da ridurre la propria al di sotto del massimo, oppure rimpicciolire inesorabilmente, sotto l'effetto dell'attrazione gravitazionale, superando la curva delle stelle di neutroni e poi, se non esistono altre possibili forme di tombe per le stelle a parte le nane bianche, le stelle di neutroni e i buchi neri, continuerà a ridursi fino a formare un buco nero.

Pertanto, la questione centrale, quella che detiene la chiave del destino ultimo delle stelle massive, è la seguente: quanto massiva può essere una stella di neutroni? Se può esserlo molto, più di qualsiasi stella normale, allora i buchi non possono mai formarsi nell'Universo reale. Se vi è una massa massima possibile per le stelle di neutroni, e se tale massimo non è troppo grande, i buchi neri *si formeranno*, a meno che non vi sia un altro possibile cimitero stellare, insospettabile negli anni Trenta.

Questo tipo di ragionamento è talmente ovvio a posteriori che appare sorprendente che né Zwicky, né Chandrasekhar, né Eddington lo abbiano seguito. Eddington non lo fece. Zwicky cercò di seguirlo, ma non sarebbe arrivato lontano; conosceva troppo poco la fisica nucleare e la relatività per essere in grado di scoprire se le leggi della fisica stabiliscono un limite alla massa delle stelle di neutroni oppure no. Al Caltech, vi erano tuttavia altre due figure che conoscevano la fisica abbastanza bene da dedurre la massa delle stelle di neutroni: Richard Chace Tolman, un chimico che era passato a occuparsi di fisica e che aveva scritto un libro di testo classico intitolato *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, e J. Robert Oppenheimer, che in seguito avrebbe diretto i tentativi americani di costruire la bomba atomica.

Tolman e Oppenheimer, tuttavia non prestarono alcuna attenzione alle stelle di neutroni di Zwicky. Ossia non vi prestarono attenzione fino al 1938, quando l'idea di una stella di neutroni venne resa pubblica (con il nome leggermente diverso di *nucleo di neutroni*) da qualcun altro, qualcuno che, al contrario di Zwicky, essi rispettavano: Lev Davidovich Landau, a Mosca.

Landau

La pubblicazione di Landau sui nuclei di neutroni era in realtà una richiesta di aiuto: le purghe staliniane imperversavano nell'Urss e Landau era in pericolo. Egli sperava che l'attenzione ricevuta dalla stampa con la sua idea dei nuclei di neutroni potesse proteggerlo dall'arresto e dalla morte. Ma di ciò Tolman e Oppenheimer non sapevano niente.

Landau era in pericolo per via dei suoi precedenti contatti con scienziati occidentali.

Subito dopo la Rivoluzione russa, la scienza era finita sotto la lente della nuova dirigenza comunista. Lo stesso Lenin nel 1919 aveva fatto passare una risoluzione all'ottavo Congresso del Partito Bolscevico che esentava gli scienziati dai requisiti della purezza ideologica: «Il problema dello sviluppo

A sinistra: Lev Landau da studente a Leningrado a metà degli anni Venti. *A destra*: Landau con i compagni di studi in fisica George Gamow e Yevgenia Kanegiesser mentre scherzano durante gli studi a Leningrado, ca. 1927. In realtà Landau non ha mai suonato uno strumento musicale. [Sinistra: per gentile concessione dell'AIP Emilio Segré Visual Archives, Margarethe Bohr Collection; destra: per gentile concessione della Biblioteca del Congresso].

industriale ed economico richiede l'uso ampio e immediato di esperti nel campo della scienza e della tecnologia che abbiamo ereditato dal capitalismo, malgrado essi siano stati inevitabilmente contaminati da idee e abitudini borghesi». Particolarmente preoccupante per i dirigenti della scienza sovietica era il deplorevole stato della fisica teorica sovietica, per cui, con la benedizione del Partito Comunista e del governo, i più brillanti e promettenti giovani teorici dell'Unione Sovietica vennero portati a Leningrado (San Pietroburgo) per qualche anno di studio universitario e poi, dopo aver completato l'equivalente di un Ph.D., vennero inviati in Europa occidentale per uno o due anni di studi post-dottorato.

Perché degli studi post-dottorato? Perché negli anni Venti la fisica era diventata così complessa che una formazione a livello di dottorato non era sufficiente per dominare la materia. Per promuovere una maggiore formazione in tutto il mondo era stato istituito un sistema di borse di studio post-dotto-

rato, ampiamente finanziato dalla Fondazione Rockfeller (con i profitti derivanti da attività petrolifere capitalistiche). Chiunque, anche dei ferventi marxisti russi, poteva concorrere per una di queste borse. I vincitori venivano chiamati *postdoctoral fellows* o semplicemente «postdoc».

Perché andare in Europa occidentale per gli studi post-dottorato? Perché negli anni Venti l'Europa era la Mecca della fisica teorica; essa ospitava quasi tutti gli eminenti fisici teorici del mondo. I leader sovietici, nel loro disperato tentativo di infondere le conoscenze europee della fisica teorica in Unione Sovietica, non avevano altra scelta che quella di inviare i loro giovani teorici a formarsi lì, nonostante i pericoli di contaminazione ideologica.

Di tutti i giovani teorici sovietici che fecero il viaggio da Leningrado all'Europa occidentale e poi tornarono in Unione Sovietica, Lev Davidovich Landau avrebbe esercitato l'influenza di gran lunga maggiore sui fisici. Nato nel 1908 in un'abbiente famiglia ebrea (suo padre era ingegnere petrolifero a Baku, sul Mar Caspio), entrò all'Università di Leningrado a sedici anni e terminò gli studi all'età di diciannove. Dopo soli due anni di studi all'Istituto fisico-tecnico di Leningrado, egli completò l'equivalente di un Ph.D. e partì per l'Europa Occidentale, dove passò diciotto mesi tra il 1929 e il 1930 visitando i grandi centri della fisica teorica in Svizzera, Germania, Danimarca, Inghilterra, Belgio e Olanda.

Rudolf Peierls, suo compagno di studi di post-dottorato a Zurigo e tedesco di nascita, scrisse in seguito: «Ho un vivido ricordo dell'impressione che Landau fece a tutti noi quando si presentò al Dipartimento Wolfgang Pauli a Zurigo nel 1929... Non ci volle molto a scoprire la profondità della sua conoscenza della fisica moderna e la sua capacità di risolvere problemi fondamentali. Raramente leggeva un articolo sulla fisica teorica nei dettagli, ma lo studiava abbastanza a lungo da capire se il problema era interessante e qual era l'approccio dell'autore. Poi si metteva a effettuare lui stesso i calcoli e se la risposta concordava con quella dell'autore approvava l'articolo». Peierls e Landau diventarono grandi amici.

Alto, magro, profondamente critico nei confronti degli altri come di se stesso, Landau si rammaricava di essere nato qualche anno troppo tardi. L'epoca d'oro della fisica, pensava, erano stati gli anni 1925-27, quando De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Bohr e altri stavano creando la meccanica quantistica; se fosse nato prima, anche lui, Landau, avrebbe potuto parteciparvi. «Tutte le belle ragazze sono state prese e sposate, e tutti i bei problemi risolti. Non me ne piace veramente nessuno di quelli rimasti», disse a Berlino nel 1929 in un momento di sconforto. Ma in realtà, l'esplorazione delle *con-*

seguenze delle leggi della meccanica quantistica e della relatività stava appena cominciando, e quelle conseguenze avrebbero riservato meravigliose sorprese: la struttura del nucleo atomico, l'energia nucleare, i buchi neri e la loro evaporazione, la superfluidità, la superconduttività, i transistor, i laser e la risonanza magnetica, per citarne solo qualcuna. E Landau, malgrado il suo pessimismo, sarebbe divenuto una figura centrale nel cammino verso la scoperta di tali conseguenze.

Al suo ritorno a Leningrado nel 1931, Landau, che era un fervente marxista e patriota, decise di dedicare la sua carriera a impiantare la moderna fisica teorica in Unione Sovietica. E vi riuscì con grande successo, come vedremo nei capitoli successivi.

Poco dopo il ritorno di Landau, calò la cortina di ferro di Stalin che rese quasi impossibili altri viaggi in Occidente. Come ha ricordato in seguito George Gamow, che fu compagno di classe di Landau a Leningrado: «La scienza russa ormai era diventata un'arma per combattere il mondo capitalistico. Come Hitler stava dividendo la scienza e le arti in ebraiche e ariane, Stalin stava creando il concetto di scienza capitalistica e di scienza proletaria. [Stava diventando] un crimine per gli scienziati russi "fraternizzare" con gli scienziati dei Paesi capitalistici».

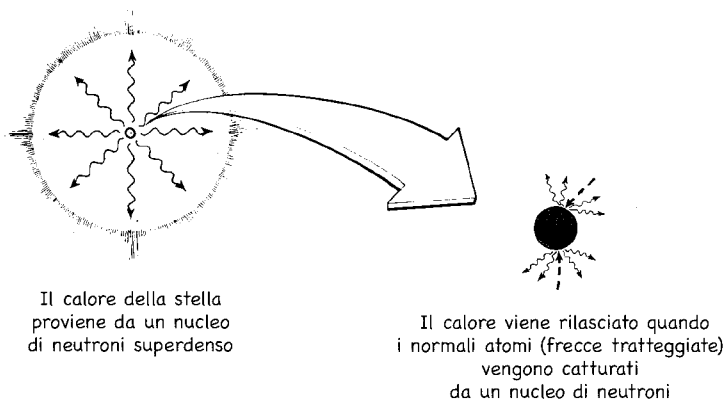
Il clima politico da cattivo divenne orribile. Nel 1936 Stalin, dopo aver ucciso 6-7 milioni di contadini e kulaki (proprietari terrieri) durante la collettivizzazione forzata dell'agricoltura, si impegnò in una purga pluriennale ai danni della dirigenza politica e intellettuale del Paese, un periodo noto come il Grande Terrore. Le purghe portarono anche all'esecuzione di quasi tutti i membri del Politburo originario di Lenin, e all'esecuzione o alla scomparsa forzata dei comandanti supremi dell'esercito sovietico, che non si sarebbero mai più rivisti, di cinquanta membri del Comitato Centrale del Partito Comunista su settantuno, della maggior parte degli ambasciatori presso Paesi stranieri e dei primi ministri e degli alti funzionari delle Repubbliche sovietiche non russe. A livelli più bassi, circa sette milioni di persone vennero arrestate e due milioni e mezzo morirono – metà di esse erano intellettuali, tra cui numerosi scienziati e intere équipe di ricerca. La biologia, la genetica e le scienze agrarie sovietiche vennero distrutte.

Alla fine del 1937 Landau, ormai un leader della ricerca nel campo della fisica teorica a Mosca, sentiva che la persecuzione si stava avvicinando. Spaventato, cercò protezione. Un modo possibile per ottenerla poteva essere quello di richiamare su di sé, in quanto eminente scienziato, l'attenzione dell'opinione pubblica, e si mise quindi a frugare tra le sue idee in cerca di una

che potesse esercitare un forte richiamo sulla stampa, sia in Occidente che a Oriente. La sua scelta cadde su un'idea sulla quale rimuginava fin dai primi anni Trenta: ossia che le stelle «normali» come il Sole potessero ospitare nel loro centro delle stelle di neutroni, che Landau chiamava *nuclei di neutroni*.

Il ragionamento alla base dell'idea di Landau era il seguente: il Sole e le altre stelle normali resistono alla compressione esercitata dalla loro gravità grazie alla pressione termica (indotta dal calore). Dato che il Sole irradia calore e luce nello spazio, deve raffreddarsi, contrarsi e morire entro circa trenta milioni di anni, a meno che non possieda un modo per rimpiazzare il calore che perde. Poiché vi erano prove geologiche schiaccianti, negli anni Venti e Trenta, del fatto che la Terra si era conservata a temperatura pressoché costante per un miliardo di anni o più, il Sole *doveva* rimpiazzare il suo calore in qualche modo. Arthur Eddington e altri avevano ipotizzato (correttamente) negli anni Venti che il nuovo calore provenisse da reazioni nucleari in cui un tipo di nucleo atomico mutava in un altro, un fenomeno oggi chiamato *combustione nucleare* o *fusione nucleare* (si veda la scheda 5.3). Tuttavia, i particolari di questa combustione nucleare, nel 1937, non erano stati elaborati in misura sufficiente a permettere ai fisici di stabilire se poteva funzionare. Il nucleo di neutroni di Landau offriva un'attraente alternativa.

Così come Zwicky poteva immaginare che una supernova venisse alimen-

5.4 – L'ipotesi di Lev Landau sull'origine dell'energia che mantiene calda una stella normale.

tata dall'energia rilasciata nell'implosione di una stella normale che dà luogo a una stella di neutroni, Landau poteva immaginare che il Sole e altre stelle normali venissero alimentati dall'energia rilasciata dai loro atomi quando venivano catturati uno dopo l'altro in un nucleo di neutroni (figura 5.4).

Catturare un atomo in un nucleo di neutroni somigliava a lasciar cadere una pietra su una lastra di cemento da una grande altezza: la gravità attira la pietra verso il basso facendole acquistare una gran velocità; quando la pietra colpisce la lastra, la sua enorme forza cinetica (l'energia del moto) può sbriciolarla in mille pezzi. Analogamente, ipotizzava Landau, la gravità al di sopra di un nucleo di neutroni potrebbe accelerare gli atomi che vi precipitano dentro fino a far raggiungere loro velocità molto elevate. Quando un atomo del genere piomba nel nucleo, il suo violento arresto converte l'enorme energia cinetica (una quantità equivalente al 10% della sua massa) in calore. In questo scenario, la fonte ultima del calore del Sole è l'intensa gravità del suo nucleo di neutroni; e come nel caso delle supernovae di Zwicky, la gravità del nucleo converte la massa degli atomi che precipitano in calore con un'efficienza del 10%.

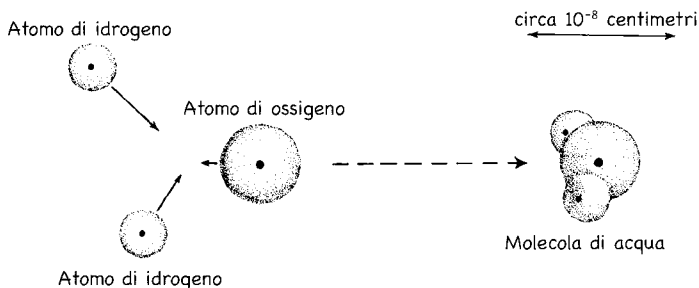
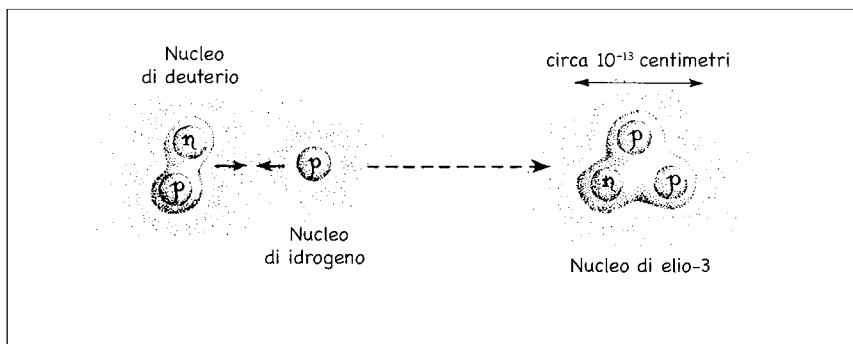
La combustione del combustibile nucleare (scheda 5.5), a differenza del caso in cui gli atomi vengono catturati in un nucleo di neutroni, può convertire solo pochi decimi dell'1% della massa del combustibile in calore. In altre parole, la fonte di calore di Eddington (l'energia nucleare) era grosso modo trenta volte meno potente di quella di Landau (l'energia gravitazionale)[5].

Landau in realtà aveva elaborato una versione più primitiva del concetto di nucleo di neutroni nel 1931. Tuttavia, il neutrone all'epoca non era ancora stato scoperto e i nuclei atomici erano un enigma, perciò la cattura degli atomi nel nucleo nel suo modello del 1931 produceva un'emissione di energia attraverso un processo totalmente ipotetico, basato sul sospetto (erroneo) che le leggi della meccanica quantistica non valessero nei nuclei atomici. Ora che il neutrone era ormai noto da cinque anni e si cominciavano a comprendere le proprietà dei nuclei atomici, Landau poteva rendere la sua idea molto più precisa e convincente. Presentarla al mondo in modo sensazionalistico avrebbe potuto allontanare da sé il pericolo delle purghe staliniane.

Verso la fine del 1937 Landau preparò un manoscritto in cui descriveva la sua idea sul nucleo di neutroni; per essere certo di attirare la massima attenzione da parte del pubblico intraprese una serie di passi inconsueti: per farlo pubblicare lo inviò, in Russia, alla «Doklady Akademii Nauk» (Atti dell'Accademia delle Scienze dell'Urss, pubblicata a Mosca) e al tempo stesso ne

Scheda 5.3
LA COMBUSTIONE (FUSIONE) NUCLEARE A CONFRONTO CON LA COMBUSTIONE ORDINARIA

La combustione ordinaria è una *reazione chimica*. Nelle reazioni chimiche, gli atomi vengono combinati in molecole, dove condividono gli uni con gli altri le loro nubi di elettroni; la nube di elettroni tiene insieme le molecole. La combustione nucleare è una *reazione nucleare*. Nella combustione nucleare i nuclei atomici si fondono insieme (*fusione nucleare*) e formano dei nuclei atomici di massa maggiore; la forza nucleare tiene insieme i nuclei più massivi.

Il seguente diagramma illustra un esempio di combustione normale: la combustione dell'idrogeno per produrre acqua (una forma di combustione di potenza esplosiva che viene utilizzata per alimentare alcuni razzi che trasportano carichi nello spazio). Due atomi di idrogeno si combinano con un atomo di ossigeno per formare una molecola d'acqua. Nella molecola d'acqua gli atomi di idrogeno e di ossigeno condividono le loro nubi di elettroni. Ma non i loro nuclei atomici.

Il diagramma nella pagina a fianco illustra un esempio di combustione nucleare: la fusione di un nucleo di deuterio («idrogeno pesante») e di un nucleo di idrogeno comune per formare un nucleo di elio-3. Questa è una delle reazioni di fusione che, come oggi sappiamo, alimentano il Sole e altre stelle, e che alimenta le bombe all'idrogeno (capitolo VI). Il nucleo di deuterio contiene un neutrone e un protone, legati assieme dalla forza nucleare; il nucleo di idrogeno consiste in un singolo protone; il nucleo di elio-3 creato dalla fusione contiene un neutrone e due protoni.

inviò una versione in inglese allo stesso famoso fisico occidentale cui si era rivolto Chandrasekhar quando Eddington lo aveva attaccato (capitolo IV), ossia a Niels Bohr a Copenaghen (Bohr, in quanto membro onorario dell'Accademia delle Scienze dell'Urss era più o meno ben accetto alle autorità sovietiche anche durante il Grande Terrore). Insieme al manoscritto Landau inviò a Bohr la seguente lettera:

> 5 novembre 1937, Mosca
>
> Egregio Sig. Bohr,
> le allego un articolo sull'energia stellare da me scritto. Se a suo parere ha senso dal punto di vista della fisica la pregherei di inviarlo a «Nature». Se non è di troppo disturbo, sarei molto lieto di conoscere la sua opinione in merito.
>
> Con profonda gratitudine,
> il suo L. Landau

(«Nature» è una rivista scientifica inglese che pubblica, con grande tempestività, annunci di scoperte in qualsiasi campo scientifico, e tra le pubblicazioni scientifiche di valore è una di quelle che gode della più ampia diffusione a livello mondiale).

Landau aveva amici altolocati, abbastanza da fare in modo che non appena fosse giunta notizia che Bohr aveva approvato il suo articolo e lo aveva inviato a «Nature», il comitato editoriale di «Izvestia» avrebbe spedito allo stesso Bohr un telegramma («Izvestia» era uno dei due giornali più influenti dell'Unione Sovietica, gestito per conto e in nome del governo sovietico). Il telegramma partì il 16 novembre 1937 e diceva:

> Ci comunichi, per cortesia, la sua opinione sul lavoro del Prof. Landau. Ci telegrafi, per cortesia, brevemente le sue conclusioni.
>
> Comitato editoriale, «Izvestia»

Bohr, evidentemente perplesso e preoccupato da quella richiesta rispose da Copenaghen lo stesso giorno:

> La nuova idea del Prof. Landau sui nuclei di neutroni delle stelle massive è eccellente e promettente in massimo grado. Sarò felice di inviarvi una breve valutazione di questa e di altre ricerche di Landau. Fatemi cortesemente sapere con più esattezza per quale scopo è richiesta la mia opinione.
>
> Bohr

Il comitato editoriale di «Izvestia» rispose che intendeva pubblicare sul giornale la valutazione di Bohr. Cosa che fecero il 25 novembre, in un articolo che descriveva l'idea di Landau e ne tesseva le lodi:

> Questa ricerca del Prof. Landau ha sollevato grande interesse tra i fisici sovietici, e la sua audace idea infonde nuova vita in uno dei processi più importanti dell'astrofisica. Vi è motivo di ritenere che la nuova ipotesi di Landau si rivelerà corretta e permetterà di risolvere tutta una serie di problemi insoluti nel campo dell'astrofisica… Niels Bohr ha valutato in modo estremamente positivo il lavoro di questo scienziato sovietico dicendo che «La nuova idea di Landau è eccellente e molto promettente».

Questa campagna non fu sufficiente a salvare Landau. Il 28 aprile 1938, di buon mattino, bussarono alla sua porta e venne portato via in una limousine nera ufficiale sotto lo sguardo scioccato di Cora, la sua futura moglie. Il destino toccato in sorte a tanti altri, diventava ora anche quello di Landau.

La limousine lo portò in una delle più tristemente note prigioni politiche di Mosca, la Butyrskaya. Lì gli dissero che la sua attività di spia tedesca era stata scoperta e che ne avrebbe dovuto pagare il prezzo. Che le accuse fossero ridicole (Landau, ebreo e fervente marxista, una spia al servizio della Germania nazista?) era irrilevante. Le accuse erano quasi sempre ridicole. Nella Russia di Stalin raramente si veniva a sapere la vera ragione per cui si era imprigionati, tuttavia, nel caso di Landau, vi sono indicazioni in documenti del KGB recentemente desecretati: parlando con dei colleghi egli aveva criticato il Partito Comunista e il governo sovietico per il loro modo di orga-

nizzare la ricerca scientifica e per i massicci arresti del 1936-37 che sarebbero sfociati nel Grande Terrore. Simili critiche erano considerate come «attività antisovietiche» e conducevano facilmente al carcere.

Landau fu fortunato. La sua prigionia durò solo un anno, e riuscì a sopravvivere, anche se a stento. Venne rilasciato nell'aprile del 1939 dopo che Pyotr Kapitsa, il più famoso fisico sperimentale sovietico chiese direttamente a Molotov e a Stalin che fosse liberato con la motivazione che Landau e solo Landau fra tutti i fisici teorici sovietici era in grado di risolvere il mistero della superfluidità[6] (la superfluidità era stata scoperta nel laboratorio di Kapitsa e, indipendentemente, da J.F. Allen e A.D. Misener a Cambridge, e se fosse stata spiegata da uno scienziato sovietico, ciò avrebbe dimostrato doppiamente al mondo il valore della scienza sovietica).

Landau uscì di prigione emaciato e gravemente malato. A tempo debito si riprese fisicamente e mentalmente, risolse il mistero della superfluidità usando le leggi della meccanica quantistica e ricevette per questo il premio Nobel. Ma il suo animo era stato spezzato. Non avrebbe mai più sopportato la minima pressione psicologica da parte delle autorità politiche.

Oppenheimer

In California, Robert Oppenheimer aveva l'abitudine di leggere attentamente tutti gli articoli scientifici pubblicati da Landau. Perciò il suo articolo sui nuclei di neutroni pubblicato sul numero di «Nature» del 19 febbraio 1938 richiamò immediatamente la sua attenzione. Venendo da Fritz Zwicky, l'idea di una stella di neutroni come fonte di energia delle supernovae era, secondo Oppenheimer, un'ipotesi bizzarra e stravagante. Venendo da Lev Landau, l'idea di un nucleo di neutroni come fonte di energia di una stella normale meritava di essere presa in seria considerazione. Era davvero possibile che il Sole possedesse un simile nucleo? Oppenheimer si ripromise di scoprirlo.

Lo stile di ricerca di Oppenheimer era completamente diverso da qualsiasi altro finora incontrato in questo libro. Mentre Baade e Zwicky lavoravano insieme su un piano di parità come colleghi il cui talento e le cui conoscenze si completavano a vicenda, e Chandrasekhar e Einstein lavoravano prevalentemente da soli, Oppenheimer lavorava con entusiasmo in mezzo a un vasto entourage di studenti. Mentre Einstein aveva sofferto quando gli avevano chiesto di insegnare, Oppenheimer traeva linfa vitale dall'insegnamento.

Come Landau, anch'egli si era recato alla Mecca della fisica teorica, in Europa occidentale, per essere istruito, e al suo ritorno, come Landau, si era lanciato nel compito di diffondere la fisica teorica nella sua terra natale.

All'epoca del suo ritorno in America, Oppenheimer aveva acquisito una tale fama che ricevette offerte di lavoro da dieci università americane, compresi Harvard e il Caltech, e da due europee. Tra le offerte ce n'era una dell'Università della California a Berkeley, in cui la fisica teorica era del tutto assente. «Visitai Berkeley», ricordò in seguito Oppenheimer, «e pensai che avrei fatto meglio ad andare lì, perché era un deserto». A Berkeley poteva creare qualcosa di interamente suo. Ma temendo le conseguenze dell'isolamento intellettuale egli accettò sia l'offerta di Berkeley che quella del Caltech. Avrebbe passato l'autunno e l'inverno a Berkeley e la primavera al Caltech. «Mantenni i contatti con il Caltech... era un posto dove mi avrebbero controllato se uscivo troppo dal seminato e dove sarei venuto a sapere cose che avrebbero potuto essere trattate in modo inadeguato nella letteratura».

All'inizio Oppenheimer, come insegnante era troppo rapido e impaziente e sovraccaricava i suoi studenti. Non si rendeva conto di quanto poco sapessero; non riusciva a mettersi al loro livello. La sua prima lezione al Caltech nella primavera del 1930 fu un tour de force – potente, elegante e arguto. Dopo la lezione, quando l'aula si era ormai svuotata, Richard Tolman, il chimico diventato fisico che era anche un suo amico, si trattenne per riportarlo con i piedi per terra: «Be', Robert», gli disse, «è stato bello, ma non ho capito un accidente».

Ma Oppenheimer imparò presto. Dopo un anno, i dottorandi e i postdottorandi a Berkeley cominciavano a piovere da ogni parte d'America per imparare la fisica da lui, e in qualche anno egli fece di Berkeley un luogo più attraente dell'Europa per i postdoc americani in fisica teorica.

Uno dei postdoc di Oppenheimer, Robert Serber, in seguito raccontò cosa significava lavorare con lui: «Oppie (come lo chiamavano i suoi studenti a Berkeley) era rapido, impaziente e con la lingua tagliente, e sembra che nei primi tempi del suo insegnamento avesse terrorizzato gli studenti. Ma dopo cinque anni di esperienza si era addolcito (se si doveva credere ai suoi primi studenti). Il suo corso [sulla meccanica quantistica] era un successo sia sul piano formativo che su quello dell'intuizione. Trasmetteva ai suoi studenti l'amore per la bellezza delle strutture logiche della fisica e la passione per i suoi sviluppi. Quasi tutti seguivano il suo corso più di una volta, e talvolta Oppie ha avuto difficoltà a dissuadere gli studenti dal ripresentarsi una terza o quarta volta...

«Oppie aveva anche un modo originale di lavorare alla ricerca con i suoi studenti. Il suo gruppo era formato da otto o dieci laureati e una mezza dozzina di postdoc. Incontrava il gruppo una volta al giorno nella sua stanza. Poco prima dell'ora prevista, i partecipanti arrivavano e prendevano posto attorno al tavolo o contro le pareti. Oppie arrivava e discuteva con tutti, uno dopo l'altro, l'andamento della ricerca e i relativi problemi, mentre gli altri ascoltavano e commentavano. Tutti entravano in contatto con una vasta gamma di argomenti. Oppenheimer si interessava di tutto, gli argomenti venivano introdotti uno dopo l'altro e coesistevano con tutti gli altri. In un solo pomeriggio potevano discutere di elettrodinamica, raggi cosmici, astrofisica e fisica nucleare».

Robert Serber (*a sinistra*) e Robert Oppenheimer (*a destra*) mentre discutono di fisica, ca 1942. [Per gentile concessione dell'U.S. Information Agency].

Ogni primavera Oppenheimer ammassava libri e articoli nella sua convertibile e vari studenti sul sedile posteriore e si dirigeva a Pasadena. «Non ci preoccupavamo affatto di lasciare le nostre case o appartamenti a Berkeley», diceva Serber, «fiduciosi di trovare a Pasadena una casetta con giardino per venticinque dollari al mese».

Per ogni problema di suo interesse, Oppenheimer sceglieva uno studente o un postdoc cui farlo sviscerare. Per il problema di Landau, ossia se un nucleo di neutroni poteva mantenere caldo il Sole, scelse Serber.

Oppenheimer e Serber si resero rapidamente conto del fatto che se il Sole avesse un nucleo di neutroni al centro, e se la massa di tale nucleo costituisse un'ampia frazione della massa solare, la sua intensa gravità eserciterebbe una presa ferrea sugli strati esterni del Sole rendendo la sua circonferenza molto più piccola di quanto in realtà non sia. Quindi, l'idea di Landau di un nucleo di neutroni poteva funzionare solo se i nuclei di neutroni fossero stati molto meno massivi del Sole.

«Quanto può essere piccola la massa di un nucleo di neutroni?», furono quindi spinti a chiedersi Oppenheimer e Serber. «Qual è la massa *minima* possibile per un nucleo di neutroni?». Si osservi che si tratta della domanda *opposta* a quella cruciale per l'esistenza dei buchi neri; per sapere se si possono formare i buchi neri occorre conoscere la *massima* massa possibile per una stella di neutroni (figura 5.3). Oppenheimer non aveva ancora nessun sospetto sull'importanza della questione della massa massima, ma sapeva che la massa minima del nucleo di neutroni era fondamentale per l'idea di Landau.

Nel suo articolo, Landau, a sua volta consapevole dell'importanza della massa minima del nucleo di neutroni, aveva usato le leggi della fisica per stimarla. Oppenheimer e Serber esaminarono accuratamente le stime di Landau. Sì, scoprirono, Landau aveva correttamente tenuto conto della forza di attrazione all'interno e in prossimità del nucleo. E sì, aveva tenuto conto correttamente della pressione di degenerazione del nucleo di neutroni (la pressione prodotta dai movimenti claustrofobici dei neutroni quando essi vengono compressi in spazi minuscoli). Ma no, non aveva tenuto debito conto della forza nucleare che i neutroni esercitano l'uno sull'altro. Questa forza non era ancora stata compresa del tutto. Tuttavia, Oppenheimer e Serber ne sapevano abbastanza per concludere che probabilmente, non con certezza definitiva, ma probabilmente, nessun nucleo di neutroni potrebbe essere più leggero di ⅒ della massa solare. Se la natura riuscisse a creare un nucleo di neutroni più leggero di così, la sua gravità sarebbe troppo debole per tenerlo insieme, e la sua pressione lo farebbe esplodere.

A prima vista, ciò non impediva al Sole di avere un nucleo di neutroni, dopotutto un nucleo pari a 1/10 della massa solare, misura ammessa dalle stime di Oppenheimer e Serber, avrebbe potuto essere così piccolo da nascondersi all'interno del Sole senza influire molto sulle sue proprietà in superficie (senza influire su ciò che noi vediamo). Ma ulteriori calcoli che mettevano a confronto l'attrazione gravitazionale del nucleo con la pressione del gas circostante mostrarono che gli effetti del nucleo non potevano restare nascosti: attorno al nucleo vi sarebbe un guscio di materia del tipo di quella delle nane bianche pesante quasi come un'intera massa solare. E avendo solo un ammontare esiguo di gas normale al di fuori di quel guscio, il Sole non potrebbe affatto apparire come lo vediamo. Perciò il Sole non poteva possedere un nucleo di neutroni, e l'energia che lo manteneva caldo doveva provenire da qualche altra parte.

Da dove? Mentre Oppenheimer e Serber effettuavano questi calcoli a Berkeley, Hans Bethe alla Cornell University di Ithaca, New York, e Charles Critchfield alla George Washington University di Washington D.C. stavano impiegando le leggi della fisica nucleare, sviluppate di recente, per dimostrare in modo particolareggiato che la combustione nucleare (la fusione dei nuclei atomici; scheda 5.3) può mantenere caldi il Sole e altre stelle. Eddington aveva ragione e Landau aveva sbagliato – almeno per quanto riguardava il Sole e la maggior parte delle altre stelle (nei primi anni Novanta si sono avuti indizi che alcune stelle giganti possano, in effetti, usare il meccanismo di Landau).

Oppenheimer e Serber non avevano idea del fatto che l'articolo di Landau fosse un disperato tentativo di sfuggire alla prigione e forse alla morte, e così, il 1° settembre 1938, mentre Landau languiva nel carcere di Butyrskaya, essi inviarono la loro critica alla «Physical Review». Dato che Landau era un fisico di fama abbastanza consolidata da poter accettare una critica, essi dissero senza giri di parole che: «Una stima di Landau... indicava il valore di 0,001 masse solari come limite [minimo] della massa [di una stella di neutroni]. Questo dato risulta errato... [Le forze nucleari] del tipo spesso ipotizzato di scambio di spin impediscono l'esistenza di un nucleo [di neutroni] per le stelle di massa paragonabile a quella del Sole».

I nuclei di neutroni di Landau e le stelle di neutroni di Zwicky sono in realtà la stessa cosa. Un nucleo di neutroni non è altro che una stella di neutroni cui capiti in qualche modo di trovarsi all'interno di una stella normale. Oppenheimer doveva averlo chiaro, e ora che aveva iniziato a riflettere sulle stelle di neutroni venne attratto inesorabilmente dalla questione che Zwicky

avrebbe dovuto affrontare ma non poteva: qual è esattamente il destino delle stelle massive dopo che hanno esaurito il combustibile nucleare che, secondo Bethe e Critchfield, le mantiene calde? A che tipo di cadaveri danno forma: nane bianche, stelle di neutroni, buchi neri o altro?

I calcoli di Chandrasekhar avevano mostrato inequivocabilmente che le stelle con una massa inferiore a 1,4 masse solari devono diventare nane bianche. Zwicky aveva riflettuto ad alta voce ipotizzando che almeno alcune stelle di massa superiore a 1,4 masse solari implodessero formando stelle di neutroni e nel processo generassero delle supernovae. Poteva Zwicky avere ragione? E potevano tutte le stelle massive morire di questa morte, salvando in tal modo l'Universo dai buchi neri?

Una delle grandi qualità di Oppenheimer in quanto teorico era l'infallibile capacità di osservare un problema complicato e spogliarlo di tutte le complicazioni fino a individuarne l'aspetto centrale decisivo. Diversi anni dopo, questa qualità avrebbe contribuito a fare di Oppenheimer il brillante leader del progetto americano di costruzione della bomba atomica. Nei suoi sforzi per capire la morte delle stelle essa gli diceva di ignorare tutte le complicazioni che Zwicky andava enfatizzando – i particolari dell'implosione stellare, la trasformazione della materia normale in materia neutronica, il rilascio di un'energia enorme che forse alimentava le supernovae e i raggi cosmici. Tutto ciò era irrilevante per la questione del *destino finale* di una stella. L'unica cosa rilevante era la massa massima di cui una stella di neutroni poteva essere dotata. Se le stelle di neutroni possono avere una massa arbitraria (curva B nella figura 5.3), i buchi neri non possono formarsi. Se esiste un limite massimo relativamente alla massa che le stelle di neutroni possono avere (curva A nella figura 5.3), una stella che superi tale limite, alla sua morte, può dare luogo a un buco nero.

Dopo aver posto la questione della massa massima con grande chiarezza, Oppenheimer procedette a risolverla metodicamente e inequivocabilmente e, secondo quella che era la sua prassi abituale, in collaborazione con uno studente, in questo caso un giovane di nome George Volkoff. Il racconto del cammino di Oppenheimer e Volkoff verso la scoperta della massa delle stelle di neutroni e dei fondamentali contributi dell'amico di Oppenheimer al Caltech, Richard Tolman, è riportato nella scheda 5.4. Si tratta di un racconto che illustra il metodo di ricerca di Oppenheimer e varie delle strategie seguite dai fisici quando comprendono chiaramente *alcune* delle leggi che governano il fenomeno che stanno studiando, ma *non tutte*: in questo caso Oppenheimer conosceva le leggi della meccanica quantistica e della relatività generale, ma né lui né nessun altro sapeva granché della forza nucleare.

Scheda 5.4
LA STORIA DI OPPENHEIMER, VOLKOFF E TOLMAN: ALLA RICERCA DELLA MASSA DELLE STELLE DI NEUTRONI

Quando si intraprende un'analisi complicata, per orientarsi è utile cominciare con un calcolo approssimativo, di un certo «ordine di grandezza», un calcolo accurato solo entro un fattore 10, ad esempio. Attenendosi a questa regola empirica, Oppenheimer affrontò la questione dell'esistenza di un limite massimo della massa che le stelle di neutroni possono avere con un calcolo sommario, lungo appena poche pagine. Il risultato era stimolante: egli individuò un massimo pari a 6 masse solari per qualsiasi stella di neutroni. Se i calcoli particolareggiati avessero fornito lo stesso risultato, Oppenheimer avrebbe potuto concludere che i buchi neri possono formarsi quando muoiono delle stelle 6 volte più pesanti del Sole.

Un «calcolo particolareggiato» significava scegliere una massa di una ipotetica stella di neutroni e poi chiedersi se, per quella massa, la pressione dei neutroni all'interno della stella potesse controbilanciare la gravità. Se era possibile raggiungere un equilibrio, la stella di neutroni poteva avere quella massa. Sarebbe stato necessario scegliere una massa dopo l'altra e interrogarsi sulla possibilità di raggiungere un equilibrio tra pressione e gravità. Si tratta di un'impresa più difficile di quanto possa sembrare, perché la pressione e la gravità si devono equilibrare *ovunque* all'interno della stella. Tuttavia, era un'impresa che era già stata affrontata in precedenza da Chandrasekhar nella sua analisi delle nane bianche (l'analisi effettuata mediante il calcolatore Braunschweiger di Arthur Eddington, con quest'ultimo che sbirciava dietro le sue spalle; capitolo IV).

Oppenheimer poteva impostare i suoi calcoli relativi alle stelle di neutroni in base a quelli di Chandrasekhar sulle nane bianche, ma solo dopo avervi apportato due modifiche fondamentali. Primo, in una nana bianca la pressione è prodotta dagli elettroni, e in una stella di neutroni dai neutroni, quindi l'*equazione di stato* (il rapporto tra pressione e densità) sarà diversa. Secondo, in una nana bianca la gravità è abbastanza debole da poter essere descritta altrettanto bene dalle leggi di Newton o dalla relatività generale di Einstein; le due descrizioni darebbero quasi esattamente gli stessi risultati, perciò Chandrasekhar scelse la descrizione più semplice, quella di Newton. Invece, in una stella di neutroni, che ha una circonferenza molto

più piccola, la gravità è così forte che usare le leggi di Newton potrebbe provocare gravi errori, e quindi Oppenheimer avrebbe dovuto descrivere la gravità mediante le leggi della relatività generale di Einstein*. A parte queste due modifiche – una nuova equazione di stato (pressione dovuta ai neutroni anziché agli elettroni) e una nuova descrizione della gravità (quella di Einstein anziché quella di Newton) – i calcoli di Oppenheimer sarebbero stati identici a quelli di Chandrasekhar.

A questo punto, Oppenheimer poteva affidare i particolari dei calcoli a uno studente. Scelse George Volkoff, un giovane di Vancouver emigrato dalla Russia nel 1924.

Oppenheinmer gli spiegò il problema e gli disse che la descrizione matematica della gravità di cui aveva bisogno si trovava in un libro di testo scritto da Richard Tolman, *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*. Ma l'equazione di stato relativa alla pressione dei neutroni era una questione molto più difficile, perché la pressione veniva influenzata dalla forza nucleare (con la quale i neutroni si attirano e respingono l'un l'altro). Sebbene si cominciasse ad avere una buona conoscenza della forza nucleare alle densità interne al nucleo atomico, era assai poco quel che se ne sapeva in presenza di densità dieci volte superiori, come quelle che i neutroni dovevano incontrare nelle profondità di una stella massiva di neutroni. I fisici non sapevano neppure se la forza nucleare a tali densità era attrattiva o repulsiva (se i neutroni si attiravano o respingevano l'un l'altro), e quindi non c'era modo di sapere se la forza nucleare riduceva o aumentava la pressione dei neutroni. Ma Oppenheimer aveva una strategia per affrontare questi aspetti sconosciuti.

Fai finta, in un primo momento, che la forza nucleare non esista, suggerì Oppenheimer a Volkoff. In quel caso tutta la pressione sarà di un tipo ben noto, la pressione di degenerazione dei neutroni (la pressione indotta dai movimenti «claustrofobici» dei neutroni). Confronta la pressione di degenerazione dei neutroni con la gravità, e in base a questo rapporto calcola la struttura e la massa che le stelle di neutroni avrebbero in un universo privo di forza nucleare. Poi, successivamente, cerca di stimare come la struttura e la massa delle stelle cambierebbero se, nel nostro Universo reale, la forza nucleare si comportasse in questo, in quello o in qualche altro modo.

---

* Si veda nell'ultimo paragrafo del capitolo I (*La natura della legge fisica*) la discussione del rapporto tra le diverse descrizioni delle leggi della fisica e i loro campi di validità.

Con istruzioni così chiare era difficile sbagliare. Ci volle solo qualche giorno a Volkoff, guidato dalle discussioni quotidiane con Oppenheimer e dal libro di Tolman, per derivare la descrizione relativistica generale della gravità all'interno di una stella di neutroni. E gli occorsero solo pochi giorni per tradurre la ben nota equazione di stato relativa alla pressione di degenerazione degli elettroni in una adatta alla pressione di degenerazione dei neutroni. Confrontando la pressione con la gravità, Volkoff ottenne una complicata equazione differenziale la cui soluzione gli avrebbe fornito la descrizione della struttura interna della stella. A questo punto si bloccò. Per quanto tentasse, Volkoff non riusciva a risolvere l'equazione differenziale che gli avrebbe fornito la formula relativa alla struttura della stella; quindi, come Chandrasekhar con le nane bianche, si vide obbligato a risolvere l'equazione numericamente. E così come Chandrasekhar aveva speso molti giorni nel 1934 premendo i tasti del calcolatore Braunschweiger di Eddington per calcolare l'analoga struttura interna delle nane bianche, Volkoff lavorò per gran parte di novembre e di dicembre 1938 premendo i tasti di un calcolatore Marchant.

Mentre Volkoff pigiava i tasti a Berkeley, Richard Tolman a Pasadena aveva preso un'altra strada: preferiva di gran lunga esprimere la struttura stellare in termini di formule anziché di soli numeri estratti da un calcolatore. Una sola formula può comprendere tutte le informazioni contenute in molte tavole di numeri. Se avesse trovato quella giusta, la formula avrebbe indicato simultaneamente la struttura delle stelle di una, due, cinque masse solari – di qualsiasi massa. Ma neppure con le sue brillanti capacità matematiche riuscì a risolvere l'equazione di Volkoff in termini di formule.

«D'altra parte», si disse presumibilmente Tolman, «sappiamo che la corretta equazione di stato non è esattamente quella che sta usando Volkoff. Volkoff ha ignorato la forza nucleare, e poiché non conosciamo i particolari di quella forza alle alte densità, non conosciamo la corretta equazione di stato. Allora, poniamoci una domanda diversa da quella di Volkoff. Chiediamoci in che modo la massa delle stelle di neutroni dipenda dall'equazione di stato. Ipotizziamo che l'equazione di stato sia molto "rigida", ovvero che indichi pressioni eccezionalmente elevate e chiediamoci quale massa avrebbero le stelle di neutroni in questo caso. Poi ipotizziamo che l'equazione di stato sia molto "flessibile" e che indichi pressioni eccezionalmente basse e chiediamoci quale massa avrebbero le stelle di neutroni.

In ogni caso, adatterò l'ipotetica equazione di stato dandole una forma che mi permetta di risolvere l'equazione differenziale di Volkoff in termini di formule. Malgrado l'equazione di stato che userò quasi certamente non sarà quella giusta, i miei calcoli mi daranno comunque un'idea generale di quale possa essere la massa della stella di neutroni se la natura dovesse preferire un'equazione di stato rigida oppure una flessibile».
Il 19 ottobre Tolman inviò una lunga lettera a Oppenheimer in cui descriveva alcune delle formule della struttura stellare e delle masse delle stelle di neutroni che aveva ottenuto in base a diverse equazioni di stato ipotetiche. Più o meno una settimana dopo, Oppenhiemer si recò a Pasadena per passare qualche giorno a parlare con Tolman del progetto. Il 9 novembre Tolman scrisse un'altra lunga lettera a Oppenheimer con altre formule.
Nel frattempo, Volkoff continuava a battere sui tasti. Agli inizi di dicembre aveva finito. Aveva i modelli numerici per le stelle di neutroni dotate di 0,3, 0,6 e 0,7 masse solari; e aveva scoperto che *se non ci fosse alcuna forza nucleare nel nostro Universo, le stelle di neutroni avrebbero sempre una massa inferiore a 0,7 masse solari.*
Che sorpresa! Le stime approssimative di Oppenheimer, prima che Volkoff iniziasse i suoi calcoli, indicavano un massimo di 6 masse solari. Per evitare che le stelle massive formassero dei buchi neri, dei calcoli accurati

Malgrado la loro scarsa conoscenza della forza nucleare, Oppenheimer e Volkoff riuscirono a dimostrare inequivocabilmente (scheda 5.4) che *esiste una massa massima per le stelle di neutroni, e che essa è compresa tra metà della massa del Sole e diverse masse solari.*

Negli anni Novanta, dopo cinquant'anni di studi ulteriori, sappiamo che Oppenheimer e Volkoff avevano ragione; in effetti esiste un limite massimo alla massa che le stelle di neutroni possono assumere, che oggi sappiamo essere compreso tra 1,5 e 3 masse solari, grosso modo il campo di variazione che essi avevano stimato. Inoltre, a partire dal 1967, gli astronomi hanno osservato centinaia di stelle di neutroni e la massa di molte di esse è stata accuratamente misurata. Tutte le masse misurate sono vicine a 1,4 volte quella del Sole; non sappiamo il perché.

La conclusione di Oppenheimer e Volkoff non deve essere risultata gradevole a persone come Eddington ed Einstein per le quali i buchi neri rappre-

avrebbero dovuto far crescere la massa massima fino a cento Soli o più. Invece, la facevano diminuire, fino a 0,7 masse solari.
Tolman si recò a Berkeley per saperne di più. Cinquant'anni dopo, Volkoff ricorda la scena con piacere: «Ero molto intimidito all'idea di dover spiegare a Oppenheimer e Tolman cosa avevo fatto. Stavamo seduti fuori sul prato del vecchio Circolo della Facoltà a Berkeley. E lì, tra l'erba verde e gli alti alberi, c'erano quei due rispettati luminari e c'ero io, uno studente che stava terminando il Ph.D. e che doveva spiegare loro i suoi calcoli».
Ora che conoscevano la massa delle stelle di neutroni in un universo immaginario senza forza nucleare, Oppenheimer e Volkoff erano pronti a stimare l'influenza della forza nucleare. A questo scopo tornavano utili le formule che Tolman aveva elaborato con tanta cura per varie equazioni di stato ipotetiche. Dalle formule di Tolman si capiva grosso modo come la struttura della stella sarebbe cambiata se la forza nucleare fosse stata repulsiva e avesse reso l'equazione di stato più «rigida» di quella usata da Volkoff, oppure attrattiva e avesse reso l'equazione di stato più «flessibile». Entro il ventaglio delle forze nucleari plausibili, tali cambiamenti non erano molto grandi. Doveva esistere una massa massima per le stelle di neutroni, conclusero Tolman, Oppenheimer e Volkoff, e doveva trovarsi in qualche punto compreso tra mezza massa solare e diverse masse solari.

sentavano un anatema. Se si doveva credere a Chandrasekhar (come nel 1938 la maggior parte degli astronomi cominciava a ritenere si dovesse fare) e a Oppenheimer e Volkoff (ed era difficile confutarli), le stelle massive non potevano trovare la loro ultima dimora né nel cimitero delle nane bianche, né in quello delle stelle di neutroni. Esisteva allora qualche plausibile possibilità che le stelle massive alla loro morte non si trasformassero in buchi neri? Sì, ce n'erano due.

Primo, tutte le stelle massive potrebbero emettere tanta materia mentre invecchiano (ad esempio, sotto l'azione di venti potenti sulla loro superficie o a causa di esplosioni nucleari) da ridursi al di sotto di 1,4 masse solari ed entrare nel cimitero delle nane bianche, oppure (se si credeva al meccanismo delle supernovae proposto da Zwicky, cosa che erano in pochi a fare) esse potrebbero emettere tanta materia attraverso le esplosioni delle supernovae da ridursi al disotto di una massa solare durante l'esplosione e finire nel ci-

mitero delle stelle di neutroni. La maggior parte degli astronomi durante tutti gli anni Quaranta e Cinquanta e fino ai primi Sessanta – ammesso che pensasse alla questione – accoglieva questa ipotesi.

Secondo, oltre alle nane bianche, alle stelle di neutroni e ai buchi neri potrebbe esservi un quarto cimitero per le stelle massive, un cimitero ignoto negli anni Trenta. Ad esempio, si potrebbe immaginare nella figura 5.3 un cimitero in corrispondenza di circonferenze intermedie tra le stelle di neutroni e le nane bianche – poche centinaia o migliaia di chilometri. La contrazione di una stella massiva potrebbe arrestarsi in un simile cimitero ancor prima che la stella diventi abbastanza piccola da trasformarsi in una stella di neutroni o in un buco nero.

Se non fossero scoppiate la Seconda Guerra Mondiale e poi la Guerra Fredda, Oppenheimer e i suoi studenti, o qualcun altro, probabilmente avrebbero esplorato questa possibilità negli anni Cinquanta e dimostrato chiaramente che un quarto cimitero del genere non esiste.

Tuttavia, la Seconda Guerra Mondiale in effetti scoppiò, e assorbì le energie di quasi tutti i fisici teorici del mondo; poi, dopo la guerra, programmi d'emergenza per la costruzione delle bombe all'idrogeno rinviarono ulteriormente il ritorno dei fisici alla normalità (si veda il capitolo seguente).

Infine, a metà degli anni Cinquanta, due fisici riemersero dalle loro attività legate alla bomba all'idrogeno e ripresero da dove Oppenheimer e i suoi studenti si erano interrotti. Essi erano John Archibald Wheeler dell'Università di Princeton e Yakov Borisovich Zel'dovich dell'Istituto di matematica applicata di Mosca – due fisici eccellenti, che rappresenteranno le figure principali del resto di questo libro.

Wheeler

Nel marzo del 1956 Wheeler dedicò molti giorni allo studio degli articoli di Chandrasekhar, Landau e Oppenheimer e Volkoff. Lì, si rese conto, c'era un mistero che valeva la pena di tentare di svelare. Poteva essere proprio vero che le stelle di massa superiore a 1,4 Soli non hanno altra scelta, alla loro morte, che quella di trasformarsi in buchi neri? «Di tutte le implicazioni della relatività generale per la struttura e l'evoluzione dell'Universo, la questione del destino delle grandi masse di materia è una delle più stimolanti», scrisse poco dopo Wheeler; e si ripropose di completare l'esplorazione dei cimiteri stellari che Chandrasekhar e Oppenheimer e Volkoff avevano iniziato.

Per dare al suo compito la massima precisione, Wheeler elaborò un'attenta descrizione delle caratteristiche del tipo di materia di cui dovevano essere fatte le stelle morte ormai fredde: egli la chiamò *materia allo stadio finale dell'evoluzione termonucleare*, poiché il termine *termonucleare* era diventato di uso comune per indicare le reazioni di fusione che alimentano la combustione nucleare nelle stelle e anche le bombe all'idrogeno. Tale materia doveva essere assolutamente fredda e aver esaurito completamente il suo combustibile nucleare; non c'era nessun modo, attraverso nessun tipo di reazione nucleare, di estrarre altra energia dai nuclei della materia. Per questa ragione, in questo libro si userà la dicitura materia fredda e morta anziché «materia allo stadio finale dell'evoluzione termonucleare».

John Archibald Wheeler, ca 1954. [Fotografia di Blackstone-Shellburne, New York City; per gentile concessione di J.A. Wheeler].

Wheeler si diede come obiettivo quello di scoprire *tutti* gli oggetti che possono essere fatti di materia fredda e morta. Essi potevano comprendere piccoli oggetti come delle sfere di ferro, oggetti più pesanti come freddi pianeti morti fatti di ferro, e oggetti ancora più pesanti: nane bianche, stelle di neutroni e qualsiasi altro tipo di freddi oggetti morti consentiti dalle leggi della fisica. Wheeler voleva un catalogo *completo* di cose fredde e morte.

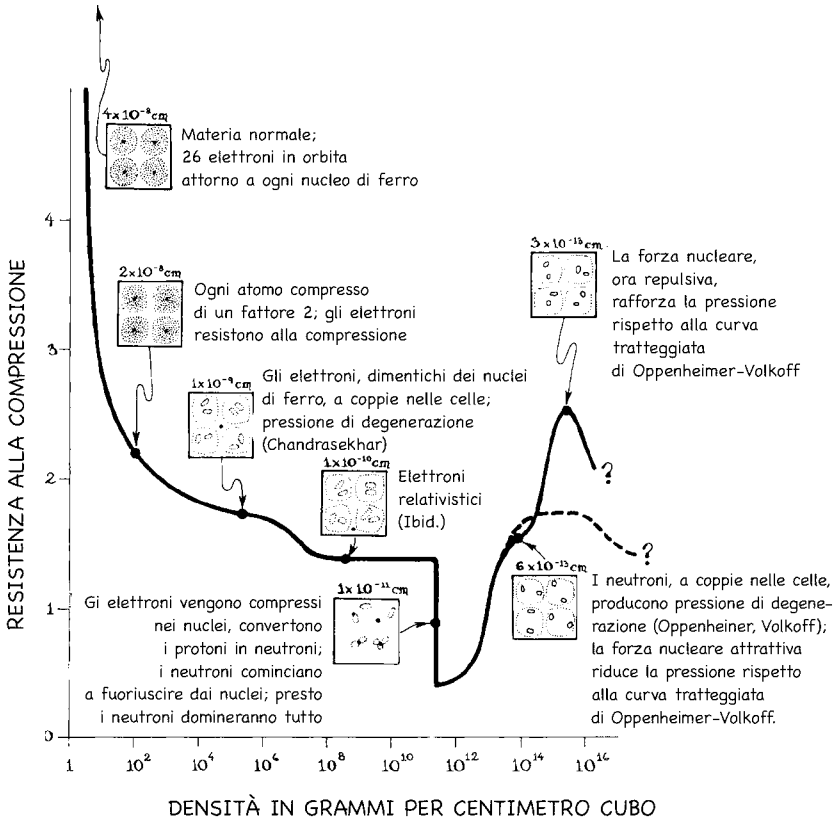
Wheeler lavorava in modo molto simile a quello di Oppenheimer, con un entourage di studenti e postdoc. Tra essi, egli scelse B. Kent Harrison, un serio mormone dello Utah, per elaborare nei dettagli l'equazione di stato della materia fredda e morta. Questa equazione di stato avrebbe descritto nei particolari in che modo la pressione di tale materia aumenta quando viene compressa gradualmente e portata a una densità sempre maggiore o, il che è equivalente, come cambia la sua resistenza alla compressione all'aumentare della densità.

Wheeler era meravigliosamente preparato per guidare Harrison nel calcolo dell'equazione di stato della materia fredda e morta perché era uno dei più grandi esperti esistenti al mondo delle leggi della fisica che governano la struttura della materia: le leggi della meccanica quantistica e la fisica nucleare. Nei venti anni precedenti aveva sviluppato dei poderosi modelli matematici per descrivere il comportamento dei nuclei atomici; assieme a Niels Bohr aveva elaborato le leggi della fissione nucleare (la divisione di nuclei atomici pesanti come l'uranio e il plutonio, il principio alla base della bomba atomica); ed era stato il leader di un'équipe che aveva progettato la bomba all'idrogeno americana (capitolo VI). Sulla scorta di questa esperienza, Wheeler guidò Harrison attraverso le intricate complicazioni dell'analisi.

Il risultato della loro analisi, l'equazione di stato della materia fredda e morta è illustrato e discusso nella scheda 5.5. Alle densità delle nane bianche era la stessa equazione di stato usata da Chandrasekhar nei suoi studi su tali oggetti (capitolo IV); alla densità delle stelle di neutroni era la stessa usata da Oppenheimer e Volkoff (scheda 5.4); alle densità al di sotto delle nane bianche e comprese tra le nane bianche e le stelle di neutroni era completamente diversa.

Con questa equazione di stato relativa alla materia fredda e morta in mano, John Wheeler chiese a Masami Wakano, un postdoc giapponese, di fare quello che Volkoff aveva fatto per le stelle di neutroni e Chandrasekhar per le nane bianche: combinare l'equazione di stato con l'equazione relativistica generale che descrive l'equilibrio tra gravità e pressione all'interno di una stella, e a partire da tale combinazione dedurre un'equazione differenziale che descriva la struttura della stella, e poi risolvere l'equazione differenziale numericamen-

Scheda 5.5

L'EQUAZIONE DI STATO PER LA MATERIA FREDDA E MORTA DI HARRISON-WHEELER

Il disegno qui sopra raffigura l'equazione di stato di Harrison-Wheeler. Sull'asse orizzontale è indicata la densità della materia. Su quello verticale, la sua resistenza alla compressione (o l'indice adiabatico, come i fisici amano chiamarlo), ovvero l'incremento percentuale di pressione che si accompagna a un aumento dell'1% della densità. Le caselle che affiancano la curva mostrano cosa accade alla materia, a livello microscopico, quando

viene compressa da basse ad alte densità. Le relative dimensioni sono indicate sopra il bordo superiore delle caselle.
A densità normali, (margine sinistro della figura) la materia fredda e morta è composta di ferro. Se i nuclei atomici della materia fossero più pesanti del ferro, l'energia potrebbe essere rilasciata dividendoli per produrre ferro (fissione nucleare, come in una bomba atomica). Se i suoi nuclei fossero più leggeri del ferro, l'energia potrebbe essere rilasciata unendoli assieme per produrre ferro (fusione nucleare, come in una bomba all'idrogeno). Una volta sotto forma di ferro, la materia non può più rilasciare energia nucleare in alcun modo. La forza nucleare tiene insieme i neutroni e i protoni più strettamente quando essi formano dei nuclei di ferro rispetto a quando formano qualsiasi altro tipo di nuclei atomici.
Quando viene compresso dalla sua normale densità di 7,6 grammi per centimetro cubo a 100 e poi a 1000 grammi per centimetro cubo, il ferro resiste attraverso gli stessi mezzi con cui una pietra resiste alla compressione. Gli elettroni di ogni atomo protestano con movimenti «claustrofobici» (di tipo degenere) contro la compressione esercitata dagli elettroni degli atomi adiacenti. La resistenza all'inizio è enorme non perché le forze repulsive siano particolarmente forti, ma perché la pressione di partenza, alle basse densità, è molto bassa (si ricordi che la resistenza è l'incremento percentuale della pressione che si accompagna a un aumento della densità dell'1%). Quando la pressione è bassa, un forte aumento della medesima rappresenta un enorme incremento percentuale e pertanto un'enorme «resistenza». Successivamente, a densità più elevate in cui la pressione è diventata consistente, un forte aumento della pressione rappresenta un incremento percentuale molto più modesto, e pertanto una resistenza molto più modesta.
All'inizio, quando la materia fredda viene compressa, gli elettroni si assiepano attorno ai loro nuclei di ferro, formando nubi di elettroni fatte di orbitali (in realtà ci sono due elettroni, e non uno, su ogni orbitale, un dettaglio tralasciato nel capitolo IV ma discusso brevemente nella scheda 5.1). Con il proseguire della compressione tutti gli orbitali e i rispettivi elettroni vengono confinati in una porzione di spazio sempre più piccola; gli elettroni claustrofobici protestano contro il confinamento diventando più simili a onde e sviluppando movimenti claustrofobici, erratici e più veloci (il «moto degenere», si veda il capitolo IV). Quando la densità ha raggiunto i 10^5 (100.000) grammi per centimetro cubo, il moto degenere degli elettroni

e la pressione di degenerazione che essi producono sono diventati tanto grandi da sopraffare completamente le forze elettriche con cui i nuclei attirano gli elettroni. Gli elettroni non si assiepano più attorno ai nuclei di ferro, ma li ignorano del tutto. La materia fredda e morta che inizialmente era un mucchio di ferro è ora divenuta quel tipo di roba di cui sono fatte le nane bianche, e l'equazione di stato è diventata quella calcolata da Chandrasekhar, Anderson e Stoner nei primi anni Trenta (figura 4.3): una resistenza pari a 5/3, e poi un passaggio graduale a 4/3 a una densità di circa 10^7 grammi per centimetro cubo in cui i movimenti erratici degli elettroni rasentano la velocità della luce.

La transizione dalla materia delle nane bianche a quella delle stelle di neutroni inizia a una densità di $4x10^{11}$ grammi per centimetro cubo, secondo i calcoli di Harrison-Wheeler. Tali calcoli mostrano diverse fasi di questa transizione: nella prima, gli elettroni cominciano a essere compressi nei nuclei atomici, e i protoni li incorporano e danno forma ai neutroni. La materia, avendo in tal modo perso un po' dei suoi elettroni che mantenevano la pressione, diventa improvvisamente molto meno resistente alla compressione; ciò provoca una caduta secca nell'equazione di stato (si veda il digramma precedente). Man mano che questa fase procede e la resistenza precipita, i nuclei atomici si riempiono sempre più di neutroni, innescando la seconda fase: i neutroni cominciano a fuoriuscire (a essere strizzati fuori) dai nuclei atomici e a immettersi nello spazio a essi circostante accanto ai pochi elettroni restanti. I neutroni espulsi, come gli elettroni, protestano contro la continua compressione generando una loro pressione di degenerazione. La pressione di degenerazione dei neutroni mette fine alla caduta a picco dell'equazione di stato; la resistenza alla compressione riprende e inizia ad aumentare. Nella terza fase, a densità comprese tra circa 10^{12} e $4x10^{12}$ grammi per centimetro cubo, tutti i nuclei rigonfi di neutroni si disintegrano completamente, ossia, si suddividono in singoli neutroni e formano il gas di neutroni studiato da Oppenheimer e Volkoff più un'esigua quantità di elettroni e protoni. Da questo punto in poi, a densità superiori l'equazione di stato assume la forma della stella di neutroni di Oppenheimer-Volkoff (nel diagramma, la curva tratteggiata, nel caso in cui non si tiene conto delle forze nucleari; la curva intera, quando si utilizzano le conoscenze più precise, ottenute negli anni Novanta, sull'influenza di tali forze).

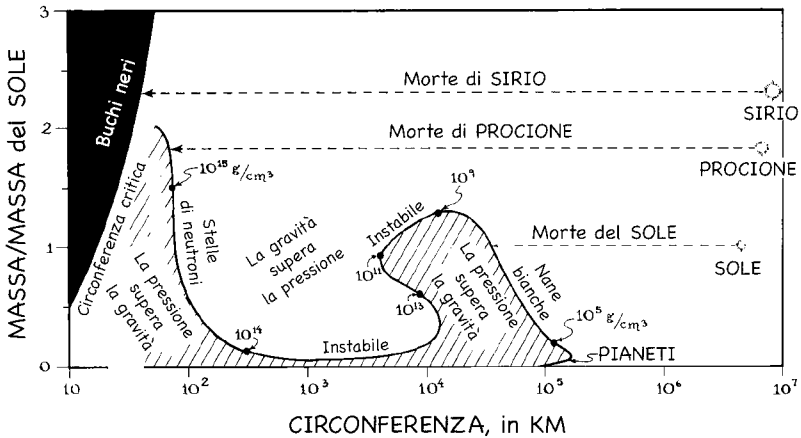
te. I calcoli numerici avrebbero fornito i particolari delle strutture interne di tutte le fredde stelle morte e, cosa più importante, della massa delle stelle.

I calcoli relativi alla struttura di una singola stella (la distribuzione della densità, della pressione e della gravità all'interno della stella) avevano richiesto a Chandrasekhar e a Volkoff molti giorni di impegno passati a premere i tasti dei loro calcolatori a Cambridge e a Berkeley negli anni Trenta. Invece Wakano, nella Princeton degli anni Cinquanta aveva a disposizione uno dei primi computer digitali del mondo, il MANIAC – una stanza piena tubi e cavi sotto vuoto costruiti presso il Princeton Institute for Advanced Study, destinati a essere usati nella progettazione della bomba all'idrogeno. Con il MANIAC, Wakano riuscì a tirar fuori la struttura di ogni stella in meno di un'ora.

I risultati dei calcoli di Wakano sono illustrati nella figura 5.5. Questa figura rappresenta il catalogo definitivo dei freddi oggetti morti, essa risponde a tutte le domande che ci siamo posti in precedenza in questo capitolo discutendo la figura 5.3.

Nella figura 5.5 la circonferenza delle stelle è indicata orizzontalmente da sinistra a destra e la massa verticalmente dal basso verso l'alto. Tutte le stelle la cui circonferenza e la cui massa rientrino nella regione bianca della figura presentano una gravità interna più forte della loro pressione, perciò essa comprimerà la stella spostandola a sinistra nel diagramma. Tutte le stelle che si trovano nella regione ombreggiata presentano una pressione più forte della gravità, perciò essa farà espandere la stella spostandola verso destra nel diagramma. Solo lungo il confine tra le due regioni la gravità e la pressione sono in perfetto equilibrio tra loro; pertanto, la curva di confine è la curva delle fredde stelle morte la cui pressione e la cui gravità sono in equilibrio.

Spostandosi lungo questa curva di equilibrio si incontrano «stelle» morte di densità sempre più alta. Alle densità più basse (lungo il bordo inferiore della figura e in gran parte nascosti alla vista) queste «stelle» non sono affatto tali; sono piuttosto pianeti freddi fatti di ferro (quando Giove esaurirà infine la sua riserva interna di calore radioattivo e si raffredderà, malgrado sia composto principalmente di idrogeno anziché di ferro, si ritroverà in prossimità del punto più a destra della curva di equilibrio). Alle densità più alte di quelle dei pianeti vi sono le nane bianche di Chandrasekhar.

Quando si raggiunge il punto più alto della parte di curva occupata dalle nane bianche (le nane bianche caratterizzate dalla massa massima di Chandrasekhar pari a 1,4 Soli[7]) e si prosegue verso densità più elevate, si incontrano stelle fredde e morte che non possono esistere in natura perché sono instabili rispetto all'implosione o all'esplosione (scheda 5.6). Spostandosi dalle

5.5 – Le circonferenze (indicate orizzontalmente), le masse (indicate verticalmente) e le densità al centro (indicate sulla curva) relativamente alle stelle fredde e morte secondo i calcoli effettuati da Masami Wakano sotto la direzione di John Wheeler usando l'equazione di stato della scheda 5.5. Per densità al centro superiori a quelle di un nucleo atomico (superiori a $2x10^{14}$ grammi per centimetro cubo), la curva a tratto intero è una moderna curva degli anni Novanta che tiene debito conto della forza nucleare, e la curva tratteggiata è quella di Oppenheimer e Volkoff senza forze nucleari.

densità delle nane bianche verso quelle delle stelle di neutroni, le masse di queste stelle dall'equilibrio instabile diminuiscono fino a un minimo di circa 0,1 masse solari con una circonferenza di mille chilometri e una pressione al centro di $3x10^{13}$ grammi per centimetro cubo. Questa è la prima stella di neutroni, il «nucleo di neutroni» che Oppenheimer e Serber avevano studiato dimostrando che non poteva essere tanto leggero da essere pari a 0,001 masse solari, valore che Landau attribuiva a un nucleo all'interno del Sole.

Spostandoci lungo la curva di equilibrio, incontriamo l'intera famiglia delle stelle di neutroni, con masse che vanno da 0,1 a circa 2 Soli. Il limite massimo di circa 2 Soli per quanto riguarda la massa delle stelle di neutroni è in qualche misura incerto anche negli anni Novanta, perché il comportamento della forza nucleare a densità molto elevate non è ancora ben conosciuto. Il massimo potrebbe anche essere pari solo a 1,5 Soli, ma non molto inferiore, o a 3 Soli, ma non molto superiore.

Scheda 5.6
GLI INSTABILI ABITANTI DELLO SPAZIO INTERMEDIO TRA LE NANE BIANCHE E LE STELLE DI NEUTRONI

Lungo la curva di equilibrio della figura 5.5 tutte le stelle comprese tra le nane bianche e le stelle di neutroni sono instabili. Un esempio è la stella con densità al centro pari a 10^{13} grammi per centimetro cubo, la cui massa e la cui circonferenza sono quelle corrispondenti al punto indicato nella figura 5.5 con 10^{13}. Nel punto 10^{13} la stella è in equilibrio; la sua gravità e la sua pressione si controbilanciano perfettamente. Tuttavia, la stella è instabile come una matita in equilibrio sulla punta.

Se una forza casuale minuscola (ad esempio la caduta sulla stella di gas interstellare) comprime appena la stella, ossia ne riduce la circonferenza facendola spostare un po' verso sinistra nella regione bianca della figura 5.5, la gravità della stella comincerà a superare la sua pressione e la porterà all'implosione; quando implode, la stella si sposterà più decisamente a sinistra fino ad attraversare la curva delle stelle di neutroni nella regione ombreggiata; lì la pressione dei neutroni salirà enormemente, arresterà l'implosione e spingerà la superficie della stella verso l'esterno finché essa non si adagerà nella tomba sotto forma di stella di neutroni, sulla curva delle stelle di neutroni.

Al contrario, se quando la stella si trova nel punto 10^{13}, invece di essere compressa verso l'interno da una minuscola forza casuale, la sua superficie viene spinta un po' verso l'esterno (ad esempio, da un aumento casuale dei movimenti erratici di alcuni dei suoi elettroni), essa entrerà nella regione ombreggiata dove la pressione supera la gravità; la pressione farà esplodere la superficie della stella, che attraverserà la curva delle nane bianche ed entrerà nella regione bianca della figura; lì la sua gravità aumenterà e la trascinerà indietro all'interno della curva delle nane bianche e come tale morirà.

L'instabilità (comprimete un po' la stella del punto 10^{13} ed essa imploderà diventando una stella di neutroni; espandetela un po' ed esploderà diventando una nana bianca) significa che nessuna stella reale può mai vivere a lungo nel punto 10^{13} o in qualsiasi altro punto lungo la porzione della curva di equilibrio indicata come «instabile».

Giunti lungo la curva di equilibrio al picco di (circa) 2 masse solari, non vi sono più stelle di neutroni. Spostandoci lungo la curva verso densità ancora superiori, le stelle in equilibrio diventano instabili allo stesso modo di quelle intermedie tra le nane bianche e le stelle di neutroni (scheda 5.6). A causa di questa instabilità, queste «stelle», come quelle intermedie tra le nane bianche e le stelle di neutroni, non possono esistere in natura. Se si formassero, imploderebbero immediatamente e diventerebbero dei buchi neri, o esploderebbero e diventerebbero stelle di neutroni.

La figura 5.5 non lascia spazio ad alcun dubbio. Non vi è *nessuna* terza famiglia di oggetti freddi e morti, stabili e massivi, che si collochi tra le nane bianche e le stelle di neutroni. Pertanto, quando stelle come Sirio, la cui massa è superiore a circa 2 Soli, esauriscono il combustibile nucleare devono espellere la massa in eccesso o imploderanno superando la densità delle nane bianche e quella delle stelle di neutroni e raggiungeranno la circonferenza critica – dove oggi, negli anni Novanta, siamo del tutto certi che dovranno dar vita a dei buchi neri. L'implosione è obbligatoria. Rispetto a stelle di massa sufficientemente grande, né la pressione di degenerazione degli elettroni, né la forza nucleare tra i neutroni possono arrestare l'implosione. La gravità sopraffà perfino la forza nucleare.

Resta tuttavia una via d'uscita per salvare tutte le stelle, anche le più massive, dal destino dei buchi neri. Forse *tutte* le stelle massive emettono abbastanza massa in una fase avanzata della loro vita (attraverso venti o esplosioni), o mentre stanno morendo, da ridursi al di sotto di 2 Soli e possono morire sotto forma di nana bianca o di stella di neutroni. Durante gli anni Quaranta, Cinquanta e i primi anni Sessanta, gli astronomi tendevano ad accogliere questa ipotesi, se mai si ponevano la questione del destino finale delle stelle (e per la maggior parte, essi non vi pensavano. Non vi erano dati derivati da osservazioni che li spingessero a riflettervi, e quelli che andavano raccogliendo su altri tipi di oggetti – stelle normali, nebulose, galassie – erano talmente abbondanti, stimolanti e gratificanti da assorbire completamente l'attenzione degli astronomi).

Oggi, negli anni Novanta, sappiamo che le stelle pesanti espellono effettivamente enormi quantità di massa mentre invecchiano e muoiono; ne espellono talmente tanta che la maggior parte delle stelle nate con una massa grande otto volte il Sole ne perde abbastanza da finire nel cimitero delle nane bianche, e la maggior parte di quelle che alla nascita avevano una massa compresa tra 8 e 20 Soli ne perde abbastanza da finire nel cimitero delle stelle di neutroni. Pertanto, la natura sembra *quasi* proteggersi dai buchi ne-

ri. Ma non del tutto: la preponderanza dei dati basati sulle osservazioni suggerisce (ma non dimostra ancora in modo inconfutabile) che la maggior parte delle stelle più pesanti alla nascita di 20 Soli è ancora così pesante alla sua morte che la pressione non offre più protezione dalla gravità ed esse implodono dando vita ai buchi neri. Esamineremo alcuni di questi dati basati sulle osservazioni nel capitolo VIII.

C'è molto da imparare sulla natura della scienza e degli scienziati dagli studi sulle stelle di neutroni e sui nuclei di neutroni degli anni Trenta.

Gli oggetti che Oppenheimer e Volkoff studiavano erano le stelle di neutroni di Zwicky e non i nuclei di neutroni di Landau, dato che essi non avevano un involucro circostante di materia stellare. Ciononostante, Oppenheimer nutriva così poco rispetto per Zwicky che rifiutò di usare il nome che questi aveva dato a tali oggetti e continuò invece a usare quello di Landau. Perciò l'articolo scritto insieme a Volkoff che descrive i loro risultati, pubblicato sul numero del 15 febbraio 1939 della «Physical Review», ha come titolo: *On Massive Neutron Cores* ('Sui nuclei di neutroni massivi'). E per essere sicuro che nessuno si sbagliasse sull'origine delle sue idee su queste stelle, Oppenheimer disseminò l'articolo di riferimenti a Landau. Non citò neppure una volta la gran quantità di articoli pubblicati in precedenza da Zwicky sulle stelle di neutroni.

Zwicky da parte sua, nel 1938 vedeva con crescente costernazione Tolman, Oppenheinmer e Volkoff portare avanti i loro studi sulla struttura delle stelle di neutroni. Come potevano fare questo, si chiedeva rabbiosamente? Le stelle di neutroni erano le sue creature, non le loro. Non avevano motivo di lavorare sulle stelle di neutroni, e inoltre, malgrado Tolman si rivolgesse a lui di tanto in tanto, Oppenheimer non lo consultava minimamente!

Nella gran quantità di articoli che Zwicky aveva scritto sulle stelle di neutroni, tuttavia, c'erano solo discorsi e ipotesi, non dettagli concreti. Era stato così occupato ad avviare (e con gran successo) una ricerca di vasta portata basata sulle osservazioni relativamente alle supernovae e a tenere conferenze e a scrivere articoli sull'idea di una stella di neutroni e sul suo ruolo rispetto alle supernovae, che non si era mai preoccupato di cercare di specificarne i particolari. Ma ora il suo spirito di competizione lo spronava ad agire. Agli inizi del 1938 fece del suo meglio per elaborare una particolareggiata teoria matematica delle stelle di neutroni e legarla alle sue osservazioni sulle supernovae. Il suo contributo migliore venne pubblicato il 15 aprile 1939 sulla «Physical Review» con il titolo: *On the Theory and Observation of Highly Collapsed*

Stars ('Sulla teoria e l'osservazione delle stelle altamente condensate'). Il suo articolo è due volte e mezzo più lungo di quello di Oppenheimer e Volkoff, non contiene un solo riferimento all'articolo di Oppenheimer e Volkoff apparso due mesi prima, mentre ne contiene invece uno a un articolo minore del solo Volkoff, e non presenta niente di memorabile. Anzi, la maggior parte di esso è semplicemente sbagliata. Invece, l'articolo di Oppenheimer e Volkoff è un tour de force, elegante, ricco di intuizioni e corretto in ogni dettaglio.

Malgrado ciò, oggi, più di mezzo secolo dopo, Zwicky è venerato per aver inventato il concetto di stella di neutroni, per aver riconosciuto, correttamente, che le stelle di neutroni vengono create nelle esplosioni delle supernovae e che le alimentano, per aver dimostrato attraverso le osservazioni, insieme a Baade, che le supernovae costituiscono in effetti una categoria unica di oggetti astronomici, per aver dato avvio e portato avanti in maniera decisiva per un decennio una ricerca sulle supernovae basata sulle osservazioni, e per una varietà di altre intuizioni che non hanno a che fare con le stelle di neutroni o le supernovae.

Come è possibile che un uomo con una conoscenza così limitata delle leggi della fisica sia stato preveggente in questa misura? La mia opinione è che egli incarnava una singolare combinazione di caratteristiche: una conoscenza della fisica teorica tale da permettergli elaborazioni corrette in termini qualitativi, se non quantitativi; una curiosità così intensa da spingerlo a occuparsi di qualsiasi cosa accadesse nell'ambito della fisica e dell'astronomia; la capacità di individuare, intuitivamente, come pochi altri avrebbero potuto, delle connessioni tra fenomeni disparati; e, non meno importante, una tale fede nella propria via alla verità che non temeva minimamente di mettersi in ridicolo con le sue ipotesi. Egli sapeva di avere ragione (anche se spesso non era così), e una montagna di prove non sarebbe bastata a convincerlo del contrario.

Landau, come Zwicky, aveva molta fiducia in se stesso e poca paura di apparire ridicolo. Ad esempio, egli non esitò a pubblicare la sua idea del 1931 secondo cui la fonte di energia delle stelle risiedeva in nuclei stellari superdensi in cui le leggi della meccanica quantistica non funzionavano. Per quanto riguardava il dominio della fisica teorica, Landau surclassava totalmente Zwicky; egli era tra i dieci principali fisici teorici del Ventesimo secolo. Eppure le sue ipotesi erano sbagliate e quelle di Zwicky erano giuste. Il Sole *non* è alimentato da nuclei di neutroni; le supernovae *sono* alimentate da stelle di neutroni. Landau era forse, al contrario di Zwicky, semplicemente sfortunato? Forse in parte. Ma c'è un altro fattore: Zwicky era immerso nell'atmosfera di Mount Wilson, all'epoca il più grande centro al mondo per le

osservazioni astronomiche. E collaborava con uno dei più grandi scienziati del mondo nel campo delle osservazioni astronomiche, Walter Baade, maestro nell'interpretare i dati ottenuti dalle osservazioni. E al Caltech egli poteva parlare quasi quotidianamente con i più grandi osservatori di raggi cosmici del mondo. Landau, invece, non aveva quasi nessun contatto diretto con le osservazioni astronomiche, e i suoi articoli lo dimostrano. Senza questo contatto egli non poteva sviluppare una profonda intuizione su come sono le cose là fuori, a distanze enormi dalla Terra. Il più grande successo di Landau consisteva nella maestria con cui aveva saputo utilizzare le leggi della meccanica quantistica per spiegare il fenomeno della superfluidità, e in questa ricerca aveva interagito ampiamente con uno scienziato sperimentale, Pyotr Kapitsa, che verificava e dimostrava i particolari della superfluidità.

Per Einstein, al contrario di Zwicky e Landau, uno stretto contatto tra osservazione e teoria era poco importante; egli scoprì le leggi relativistiche generali della gravità quasi senza l'apporto di osservazioni. Ma si trattava di una rara eccezione. Un consistente scambio tra osservazione e teoria è essenziale per il progresso nella maggior parte dei campi della fisica e dell'astronomia.

E che dire di Oppenheimer, un uomo la cui conoscenza della fisica era comparabile a quella di Landau? L'articolo da lui scritto insieme a Volkoff sulla struttura delle stelle di neutroni è uno dei più grandi articoli di astrofisica di tutti i tempi. Ma, per quanto geniale ed elegante, «si limitava» a specificare i dettagli del concetto di stella di neutroni che, in realtà, era una creatura di Zwicky, come lo erano le supernovae e il loro meccanismo di alimentazione attraverso l'implosione di un nucleo stellare che avrebbe dato vita a una stella di neutroni. Perché Oppenheimer, che aveva tante frecce al suo arco, era molto meno innovativo di Zwicky? In primo luogo, penso, perché rifiutava, e forse addirittura temeva, di formulare ipotesi speculative. Isidor I. Rabi, grande amico e ammiratore di Oppenheimer, ha descritto ciò in modo molto più profondo: «A me sembra che per certi versi Oppenheimer avesse un timore eccessivo verso i campi estranei alla tradizione scientifica, come il suo interesse per la religione, in particolare quella induista, che gli procurava una sensibilità verso il mistero dell'Universo che lo avvolgeva quasi come una nebbia. Aveva una visione chiara della fisica, per quanto riguardava ciò che era già stato fatto, ma ai margini era portato a credere che ci fossero cose più misteriose e innovative di quante ce ne fossero in realtà. Non aveva abbastanza fiducia nel potere degli strumenti intellettuali che già possedeva e non portava il suo pensiero davvero a compimento perché sentiva istintivamente che erano necessari idee e metodi nuovi per spingersi oltre il punto in cui lui e i suoi studenti erano già arrivati».

VI. IMPLOSIONE VERSO COSA?

Dove tutto l'armamentario della fisica teorica
non riesce a spazzare via la conclusione:
l'implosione produce buchi neri

Lo scontro era inevitabile. Questi due giganti del mondo intellettuale, J. Robert Oppenheimer e John Archibald Wheeler, avevano una visone dell'Universo e della condizione umana talmente diversa che sulle grandi questioni si ritrovarono una volta dopo l'altra su fronti opposti, sulla sicurezza nazionale, sulla politica degli armamenti nucleari, e ora sui buchi neri.

Lo scenario era un'aula dell'Università di Bruxelles, in Belgio. Oppenheimer e Wheeler, che erano vicini a Princeton, si erano riuniti lì assieme ad altri trentuno eminenti fisici ed astronomi provenienti da tutto il mondo per una intera settimana di discussioni sulla struttura e l'evoluzione dell'Universo.

Era martedì 10 giugno 1958. Wheeler aveva appena terminato di illustrare alla dotta assemblea i risultati dei calcoli realizzati recentemente insieme a Kent Harrison e Masami Wakano, i calcoli che avevano individuato inequivocabilmente la massa e la circonferenza di tutte le possibili stelle fredde e morte (capitolo V). Aveva completato le parti mancanti nei calcoli di Chandrasekhar e Oppenheimer-Volkoff, e aveva confermato le loro conclusioni: l'implosione è obbligatoria quando una stella di massa superiore a 2 Soli muore, e non può dar luogo a una nana bianca né a una stella di neutroni, né a qualsiasi altro tipo di stella fredda e morta, a meno che morendo non espella abbastanza massa da ritirarsi al di sotto del limite massimo di 2 Soli.

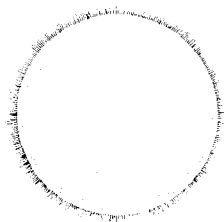
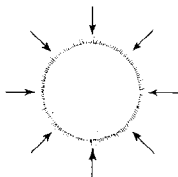
«Di tutte le implicazioni della relatività generale per la struttura e l'evoluzione dell'Universo, la questione del destino delle grandi masse di materia è una delle più stimolanti», affermò Wheeler. Su questo punto l'uditorio poteva concordare. Poi Wheeler, quasi replicando l'attacco di Arthur Eddington a Chandrasekhar di ventiquattro anni prima (capitolo IV), espose la visione di Oppenheimer secondo cui le stelle massive devono morire implodendo e trasformandosi in buchi neri, e poi la confutò: una simile implosione «non

dà una risposta accettabile», affermò Wheeler. Perché no? Essenzialmente per la stessa ragione per cui l'aveva respinta Eddington; per usare le parole di quest'ultimo, doveva esserci «una legge di natura che impedisca a una stella di comportarsi in questo modo assurdo». Ma c'era una profonda differenza tra Eddington e Wheeler: mentre l'ipotetico meccanismo che secondo Eddington, nel 1935, avrebbe dovuto salvare l'Universo dai buchi neri era stato immediatamente bollato come erroneo da esperti del calibro di Niels Bohr, il meccanismo ipotetico di Wheeler del 1958, all'epoca, non poteva venire confermato né smentito, e quindici anni dopo si sarebbe rivelato parzialmente corretto (capitolo XII).

L'ipotesi di Wheeler era la seguente. Poiché (a suo parere) l'implosione in un buco nero andava respinta come fisicamente implausibile, «sembra non si possa sfuggire alla conclusione che i nucleoni [neutroni e protoni] al centro di una stella che implode devono dissolversi in radiazioni, e che queste radiazioni devono fuoriuscire dalla stella abbastanza velocemente da ridurne la massa [al di sotto di circa 2 Soli]», e permetterle di finire nel cimitero delle stelle di neutroni. Wheeler riconobbe subito che la conversione dei nucleoni in un'emissione di radiazioni superava i limiti delle leggi della fisica conosciute. Tuttavia, tale conversione avrebbe potuto derivare dal non ancora ben compreso «matrimonio» tra le leggi della relatività generale e quelle della meccanica quantistica (capitoli XII-XIV). Questo, per Wheeler, era l'aspetto più seducente del «problema delle grandi masse»: l'assurdità dell'implosione destinata a dar vita a dei buchi neri lo costrinse a prendere in considerazione un processo fisico del tutto nuovo (si veda la figura 6.1).

Oppenheimer non si lasciò impressionare. Quando Wheeler terminò il suo intervento, egli fu il primo a prendere la parola e, con una cortesia che non aveva sfoggiato da giovane, affermò il suo punto di vista: «Io non so se delle masse non rotanti molto più pesanti del Sole si formino davvero nel corso dell'evoluzione stellare, ma in tal caso credo che la loro implosione possa essere descritta nel quadro della relatività generale [senza formulare nuove leggi fisiche]. Non sarebbe più semplice ipotizzare che tali masse subiscano una contrazione gravitazionale continua e infine si taglino sempre più fuori dal resto dell'Universo [ossia, diventino buchi neri]?» (si veda la figura 6.1).

Wheeler fu altrettanto cortese, ma restò sulle sue posizioni. «È molto difficile ritenere l'"isolamento gravitazionale" una risposta soddisfacente», replicò.

La convinzione di Oppenheimer circa l'esistenza dei buchi neri nasceva dai calcoli particolareggiati che aveva effettuato diciannove anni prima.

6.1 – Il contrasto tra la visione di Oppenheimer circa il destino delle grandi masse (sequenza in alto) e quella di Wheeler del 1958 (sequenza in basso).

La nascita dei buchi neri: un primo sguardo

Nell'inverno del 1938-1939, dopo aver appena terminato insieme a George Volkoff i calcoli relativi alle masse e alle circonferenze delle stelle di neutroni (capitolo V), Oppenheimer era fermamente convinto del fatto che le stelle massive, quando muoiono, debbano implodere. La sfida seguente era ovvia: usare le leggi della fisica per calcolare i particolari dell'implosione. Come sarebbe apparsa l'implosione a qualcuno che l'avesse osservata trovandosi in orbita attorno alla stella? E come sarebbe apparsa vista dalla sua superficie? Quale sarebbe lo stato finale della stella implosa, migliaia di anni dopo l'implosione?

Il calcolo non sarebbe stato facile. La sua elaborazione matematica sarebbe stata la più impegnativa mai intrapresa da Oppenheimer e dai suoi studenti. Le caratteristiche della stella in fase di implosione sarebbero mutate rapidamente col passare del tempo, mentre le stelle di neutroni di Oppen-

heimer-Volkoff erano statiche, immutabili. La curvatura dello spaziotempo sarebbe diventata enorme all'interno della stella in fase di implosione, mentre era molto più modesta nelle stelle di neutroni. Per affrontare tante complessità occorreva uno studente assai speciale. La scelta era ovvia: Hartland Snyder.

Snyder era diverso dagli altri studenti di Oppenheimer. Gli altri provenivano da famiglie del ceto medio, mentre Snyder dava l'impressione di appartenere alla classe lavoratrice, sebbene suo padre fosse in realtà un ingegnere. Correva voce (falsa) che prima di dedicarsi alla fisica facesse il camionista nello Utah. Come ricorda Robert Serber, «Hartland disprezzava molte cose che per gli studenti di Oppenheimer erano la norma, come apprezzare Bach e Mozart, andare a sentire un quartetto d'archi, amare il cibo raffinato ed essere progressisti».

I fisici nucleari del Caltech erano un gruppo molto più burrascoso degli studenti di Oppenheimer; Hartland si inseriva perfettamente nel viaggio che Oppenheimer faceva ogni anno a Pasadena in primavera. Come dice William Fowler, anche lui membro del Caltech, «Oppie era estremamente colto, conosceva la letteratura, l'arte, la musica, il sanscrito. Ma Hartland era rozzo come noi. Gli piacevano i party del Kellog Lab dove Tommy Lauritsen suonava il piano e Charlie Lauritsen [direttore del Lab] suonava il violino, e cantavamo canzoni da studenti e da ubriaconi. Di tutti gli studenti di Oppie, Hartland era il più indipendente».

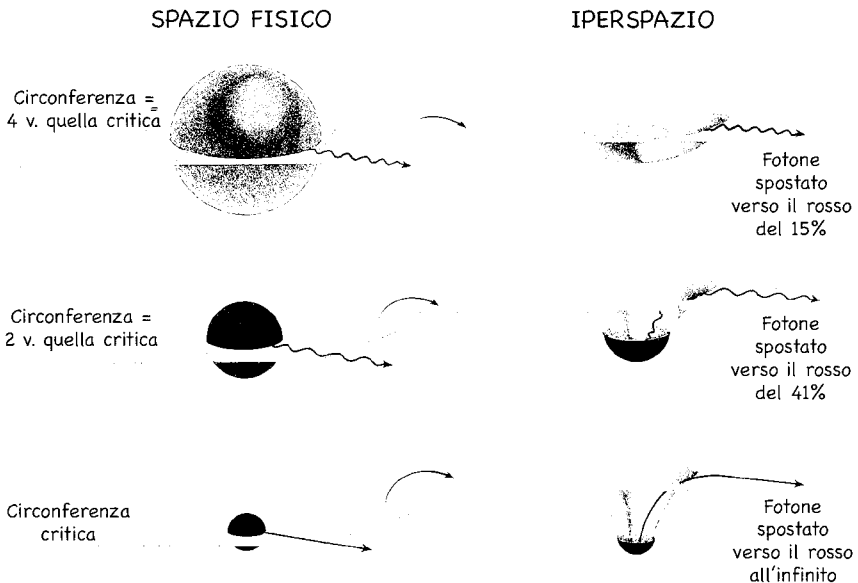
Hartland era diverso anche a livello mentale. «Hartland aveva più talento per la matematica difficile di tutti noi», ricorda Serber. «Era molto bravo a perfezionare i calcoli approssimativi che facevamo noialtri». Era questo talento a renderlo una scelta naturale per i calcoli sull'implosione.

Prima di lanciarsi nei veri e propri calcoli completi, Oppenheimer insisté (come sempre) per effettuare prima una rapida disamina del problema. Quanto si poteva apprendere semplicemente con un piccolo sforzo? La chiave di questa disamina fu la geometria di Schwarzschild dello spaziotempo deformato all'esterno di una stella (capitolo V).

Schwarzschild aveva scoperto la geometria dello spaziotempo come soluzione all'equazione di campo della relatività generale di Einstein. Era la soluzione per l'esterno di una stella statica, che non implode, non esplode e non pulsa. Tuttavia, nel 1923, George Birkhoff, un matematico di Harvard, aveva dimostrato un notevole teorema matematico: la geometria di Schwarzschild descrive l'esterno di qualsiasi stella sferica, comprese, oltre a quelle statiche, anche quelle che implodono, esplodono, o pulsano.

Per i loro calcoli rapidi, quindi, Oppenheimer e Snyder ipotizzarono semplicemente che una stella sferica, una volta esaurito il combustibile nucleare, imploda indefinitamente, e senza dimostrare cosa accada all'interno della stella essi calcolarono come sarebbe apparsa in fase di implosione a qualcuno che si fosse trovato a grande distanza. Facilmente dedussero che, dato che la geometria dello spaziotempo all'esterno di una stella in fase di implosione è identico a quello all'esterno di qualsiasi stella statica, le stelle in fase di implosione sembreranno molto simili a una sequenza di stelle statiche, ognuna più compatta della precedente.

L'aspetto esterno di queste stelle statiche era stato studiato due decenni prima, intorno al 1920. La figura 6.2 riproduce i *diagrammi a incasso* che abbiamo usato nel capitolo III per illustrare questo aspetto. Si ricordi che ogni diagramma a incasso raffigura la curvatura dello spazio all'interno e

6.2 – Identica alla figura 3.4. Le previsioni della relatività generale sulla curvatura dello spazio e lo spostamento della luce verso il rosso con riferimento a tre stelle statiche (non in fase di implosione) molto compatte, tutte della stessa massa ma di circonferenza diversa.

nelle vicinanze di una stella. Per rendere la raffigurazione comprensibile, il diagramma mostra la curvatura solo di due delle tre dimensioni spaziali: le due dimensioni raffigurate su un foglio collocato esattamente sul «piano» equatoriale della stella (parte sinistra della figura). La curvatura dello spazio su questo foglio si può visualizzare immaginando di estrarre il foglio dalla stella e dallo spazio fisico in cui noi e la stella viviamo e di spostarlo all'interno di un *iperspazio* piatto (non curvo) fittizio. Nell'iperspazio non curvo il foglio può conservare la sua geometria curva solo piegandosi verso il basso come una scodella (parte destra della figura).

La figura mostra una sequenza di tre stelle statiche che simulano l'implosione che Oppenheimer e Snyder si preparavano ad analizzare. Ogni stella ha la stessa massa, ma una circonferenza diversa. La prima è quattro volte più ampia della *circonferenza critica* (quattro volte più grande della circonferenza alla quale la gravità della stella diventa così forte da dare vita a un buco nero). Quella della seconda è due volte la circonferenza critica e quella della terza è esattamente la circonferenza critica. Il diagramma a incasso indica che più la stella si avvicina alla circonferenza critica, più la curvatura del suo spazio esterno diventa estrema. Tuttavia, la curvatura non diventa infinitamente estrema. La geometria a scodella è omogenea ovunque senza cuspidi, punte aguzze o pieghe, anche quando la stella raggiunge la sua circonferenza critica; ovvero, la curvatura dello spaziotempo non è infinita e, di conseguenza, poiché le *forze gravitazionali di marea* (il tipo di forze che allungano un individuo dalla testa ai piedi e producono le maree sulla Terra) sono la manifestazione fisica della curvatura dello spaziotempo, la marea gravitazionale, alla circonferenza critica, non è infinita.

Nel capitolo III abbiamo esaminato il destino della luce emessa dalla superficie delle stelle statiche. Abbiamo appreso che poiché il tempo scorre più lentamente nei pressi della superficie stellare che non lontano da essa (*dilatazione gravitazionale del tempo*), le onde luminose emesse dalla superficie della stella e ricevute a grande distanza avranno un periodo di oscillazione più lungo e di conseguenza una maggiore lunghezza d'onda e un colore più rosso. La lunghezza d'onda della luce viene spostata verso l'estremità rossa dello spettro quando la luce fuoriesce dall'intenso campo gravitazionale della stella (*spostamento gravitazionale verso il rosso*). Quando la stella statica è quattro volte più ampia della sua circonferenza critica, la lunghezza d'onda della luce viene allungata del 15% (si veda il fotone di luce della parte superiore destra della figura); quando la stella misura due volte la circonferenza critica lo spostamento verso il rosso è del 41% (al centro, a destra),

e quando la stella misura esattamente la circonferenza critica, la lunghezza d'onda della luce è spostata infinitamente verso il rosso, il che significa che alla luce non è rimasta nessuna energia e pertanto ha cessato di esistere.

Oppenheimer e Snyder, nei loro calcoli sommari, dedussero due cose da questa sequenza di stelle statiche: primo, una stella in fase di implosione, come queste stelle statiche, svilupperà probabilmente una forte curvatura dello spaziotempo mentre si avvicina alla sua circonferenza critica, ma non una curvatura infinita, e quindi non forze gravitazionali di marea infinite. Secondo, quando la stella implode, la luce emessa dalla sua superficie dovrebbe diventare sempre più rossa, e quando raggiunge la circonferenza critica lo spostamento verso il rosso dovrebbe diventare infinito, rendendo la stella completamente invisibile. Per usare le parole di Oppenheimer, la stella dovrebbe «tagliarsi fuori» visivamente dal nostro Universo esterno.

C'era un modo, si chiesero Oppenheimer e Snyder, per cui le sue proprietà interne – ignorate in questi calcoli sommari – avrebbero potuto salvare la stella da questo destino di isolamento? Ad esempio, l'implosione poteva essere costretta a procedere così lentamente da non far mai raggiungere alla stella, neanche dopo un tempo infinito, la circonferenza critica?

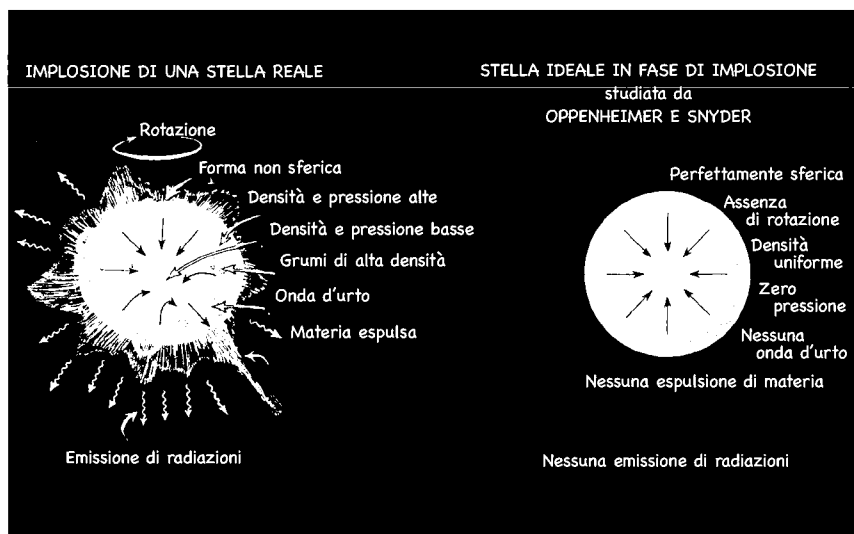
Oppenheimer e Snyder avrebbero voluto rispondere a queste domande calcolando i particolari di un'implosione stellare realistica, come quella raffigurata nella parte sinistra della figura 6.3. Qualsiasi stella reale ruoterà, come fa la Terra, almeno un po'. Le forze centrifughe dovute a tale rotazione obbligheranno l'equatore della stella a rigonfiarsi verso l'esterno almeno un po', come fa l'equatore della Terra. Perciò, la stella non può essere esattamente sferica. Quando implode, la stella deve ruotare sempre più veloce, come un pattinatore artistico che racchiude le braccia, e la sua rotazione più veloce farà aumentare le forze centrifughe all'interno della stella, rendendo il rigonfiamento dell'equatore più pronunciato – abbastanza pronunciato, forse, da arrestare addirittura l'implosione, con le forze centrifughe dirette verso l'esterno che controbilanciano completamente l'attrazione gravitazionale. Qualsiasi stella reale presenta una densità e una pressione elevate al centro e minori negli strati esterni; mentre implode spunteranno qua e là grumi di alta densità, come dei mirtilli in un muffin. Inoltre, la materia gassosa della stella, al suo implodere, formerà delle onde d'urto – analoghe alle onde dell'oceano quando si infrangono – e tali urti possono espellere materia e massa da alcune parti della superficie della stella, esattamente come un'onda marina può scagliare nell'aria goccioline d'acqua. Infine, le radiazioni (onde elettromagnetiche, onde gravitazionali, neutrini) si riverseranno in

gran quantità fuori della stella, trasportando con sé della massa. Oppenheimer e Snyder avrebbero voluto includere tutti questi effetti nei loro calcoli, ma si trattava di un compito formidabile, ben al di là delle capacità di qualsiasi fisico o calcolatore nel 1939. Non sarebbe stato fattibile fino all'avvento dei supercomputer negli anni Ottanta. Perciò, per ottenere qualche progresso occorreva costruire un modello astratto di stella in fase di implosione e poi calcolare quanto le leggi della fisica prevedevano per tale modello.

Questo tipo di astrazioni erano il punto forte di Oppenheimer: quando si trovava di fronte a una situazione orribilmente complicata riusciva a individuare in maniera quasi infallibile i fenomeni di importanza cruciale da quelli secondari.

Per la stella in fase di implosione una caratteristica era, secondo Oppenheimer, importante sopra ogni altra: la gravità così come era descritta dalle leggi della relatività generale di Einstein. Essa e solo essa non doveva venire sacrificata nel formulare i calcoli che potevano essere fatti. Al contrario, la rotazione della stella e la sua forma non sferica potevano essere ignorate; esse potevano essere di importanza cruciale per *alcune* stelle in fase di implosione, ma su quelle che ruotano lentamente non esercitavano probabilmente un effetto rilevante. Oppenheimer non era in grado di dimostrarlo matematicamente, ma intuitivamente sembrava chiaro, e in effetti si è rivelato vero. Analogamente, gli diceva l'intuizione, l'emissione di radiazioni era un dettaglio trascurabile, come le onde d'urto e i grumi di densità. Inoltre, dato che (come Oppenheimer e Volkoff avevano dimostrato) la gravità potrebbe sopraffare qualsiasi pressione nelle stelle massive morte, sembrava plausibile fingere (in modo erroneo, naturalmente) che la stella in fase di implosione non avesse alcun tipo di pressione interna, né quella termica, né quella prodotta dal moto degenere claustrofobico degli elettroni o dei neutroni, né quella generata dalla forza nucleare. Una stella reale, con la sua pressione reale, poteva implodere in modo diverso da una stella astratta e priva di pressione, ma le differenze nell'implosione sarebbero state modeste, non grandi, suggeriva a Oppenheimer la sua intuizione.

Così Oppenheimer propose a Snyder un problema di calcolo astratto: studiare, utilizzando le leggi esatte della relatività generale, l'implosione di una stella ideale, perfettamente sferica, che non ruota e non emette radiazioni, una stella dalla densità uniforme (la stessa alla superficie come al centro) e priva di pressione interna di qualsiasi tipo (si veda la figura 6.3).

Anche con tutte queste semplificazioni, che avrebbero sollevato lo scetticismo degli altri fisici per i trent'anni seguenti, i calcoli erano eccessivamente

6.3 – *A sinistra*: i fenomeni fisici in una stella reale in fase di implosione. *A destra*: le semplificazioni apportate da Oppenheimer e Snyder per poter calcolare l'implosione stellare.

difficili. Per fortuna Richard Tolman a Pasadena era pronto a dare una mano. Ricorrendo ampiamente ai consigli di Oppenheimer e Tolman, Snyder formulò le equazioni che governavano l'intera implosione, e con un grande sforzo riuscì a risolverle. Ora disponeva di tutti i dettagli dell'implosione espressi in formule! Esaminando tali formule, prima in una direzione e poi nell'altra, i fisici avrebbero potuto decifrare qualsiasi aspetto dell'implosione desiderassero, come appare dall'esterno della stella, dall'interno, sulla superficie e così via.

Particolarmente affascinante è l'aspetto della stella in fase di implosione osservato da un *quadro di riferimento statico esterno*, ossia, visto da un osservatore al di fuori della stella che resta sempre sulla stessa circonferenza fissa invece di essere attratto verso l'interno come la materia mentre implode. La stella, vista da un quadro statico esterno, inizia a implodere proprio come ce lo si aspetterebbe. Come una pietra fatta cadere da un tetto, la superficie della stella crolla verso l'interno (si contrae all'interno) dapprima lentamente,

poi sempre più rapidamente. Se la legge di gravità di Newton fosse stata corretta, questa accelerazione dell'implosione sarebbe proseguita inesorabilmente fin quando la stella, priva di pressione interna, non si sarebbe compressa in un punto ad alta velocità. Non accadeva così secondo le formule relativistiche di Oppenheimer e Snyder. Al contrario, mentre la stella si avvicina alla circonferenza critica, il suo rimpicciolimento rallenta notevolmente. Più diventa piccola, più la stella implode lentamente, finché non resta *congelata* esattamente nella sua circonferenza critica. Non importa quanto a lungo si aspetti, se ci si trova in stato di quiete al di fuori della stella (ossia, in stato di quiete nel quadro di riferimento statico esterno) non si riuscirà mai a vedere la stella implodere al di là della sua circonferenza critica. Questo è il messaggio inequivocabile delle formule di Oppenheimer e Snyder.

Il congelamento dell'implosione era provocato da qualche inattesa forza relativistica generale all'interno della stella? No, affatto, compresero Oppenheimer e Snyder. Era causato invece dalla dilatazione gravitazionale del tempo (il rallentamento dello scorrere del tempo) in prossimità della circonferenza critica. Il tempo sulla superficie di una stella che sta implodendo, visto da osservatori statici esterni, deve scorrere sempre più lentamente man mano che la stella si avvicina alla sua circonferenza critica, e di conseguenza tutto ciò che accade sulla stella, o al suo interno, compresa la sua implosione, deve sembrare svolgersi al rallentatore, e poi congelarsi gradualmente.

Per quanto ciò possa sembrare singolare, un'altra delle previsioni fornite dalle formule di Oppenheimer e Snyder lo era ancora di più: sebbene, vista da osservatori statici esterni, l'implosione si congeli una volta giunta alla circonferenza critica, essa non si congela affatto agli occhi di osservatori che si muovano verso la superficie della stella. Se la stella pesa qualche massa solare e comincia ad avere circa le dimensioni del Sole, se osservata dalla sua superficie, implode fino alla circonferenza critica in circa un'ora, e poi continua a implodere al di là del punto critico raggiungendo circonferenze sempre più piccole.

Nel 1939, quando Oppenheimer e Snyder facevano queste scoperte, i fisici si erano ormai abituati al fatto che il tempo è relativo; lo scorrere del tempo è diverso se misurato in quadri di riferimento diversi che si muovono in modi diversi nell'Universo. Ma nessuno aveva mai incontrato prima una differenza così estrema tra i quadri di riferimento. Che *l'implosione si congeli per sempre se misurata in un quadro statico esterno, ma prosegua rapidamente oltre il punto di congelamento se misurata nel quadro della superficie della stella* era estremamente difficile da comprendere. Nessuno di coloro che si

cimentavano con le formule matematiche di Oppenheimer e Snyder si sentiva a suo agio con una deformazione del tempo tanto estrema. Eppure, era prevista dalle loro formule. Ci si poteva affannare a escogitare qualche spiegazione euristica, ma nessuna sembrava davvero convincente. Essa non sarebbe stata compresa fino alla fine degli anni Cinquanta (verso la fine di questo capitolo).

Guardando le formule di Oppenheimer e Snyder dal punto di vista di un osservatore sulla superficie della stella, si possono dedurre i dettagli dell'implosione anche dopo che la stella sia sprofondata nella sua circonferenza critica, ossia, si può scoprire che la stella viene compressa a una densità infinita e a zero volume e dedurre i particolari della curvatura dello spaziotempo al momento del collasso. Tuttavia, nell'articolo che descriveva i loro calcoli, Oppenheimer e Snyder evitarono di discutere in qualsiasi modo tale collasso. Presumibilmente, era il suo innato conservatorismo scientifico, la sua avversione per la speculazione (si vedano gli ultimi due paragrafi del capitolo V), a impedire a Oppenheimer di farlo.

Se interpretare il collasso finale della stella a partire dalle loro formule era troppo per Oppenheimer e Snyder, perfino i particolari che riguardavano la circonferenza critica stessa e il suo esterno erano troppo bizzarri per la maggior parte dei fisici del 1939. Al Caltech, ad esempio, Tolman ci credeva; dopotutto quelle previsioni erano una conseguenza inevitabile della relatività generale. Ma nessun altro, nemmeno al Caltech, ne era davvero convinto. La relatività generale era stata verificata sperimentalmente solo all'interno del Sistema Solare, dove la gravità è così debole che le leggi di Newton forniscono quasi le stesse previsioni della relatività generale. Invece, le bizzarre previsioni di Oppenheimer e Snyder si basavano su una gravità superintensa. La relatività generale poteva anche cessare di essere valida prima che la gravità divenisse tanto forte, pensava la maggior parte dei fisici; e anche se non cessava di essere valida, Oppenheimer e Snyder potevano aver interpretato male ciò che le loro formule volevano dire; e anche se non avevano interpretato male le loro formulazioni matematiche, i loro calcoli si riferivano a un'ipotesi così astratta e semplificata, priva di rotazione, di grumi, di onde d'urto e radiazioni, che non potevano essere presi sul serio.

Questo scetticismo imperava negli Stati Uniti e in Europa occidentale, ma non in Unione Sovietica. Lì Landau, che si stava ancora riprendendo dal suo anno di prigionia, stilava una «golden list» dei più importanti articoli pubblicati nel mondo sulla ricerca nel campo della fisica. Dopo aver letto l'articolo di Oppenheimer e Snyder, Landau lo inserì nella sua lista e proclamò ai

suoi amici e colleghi che le ultime rivelazioni di Oppenheimer dovevano essere corrette, anche se erano molto difficili da comprendere per la mente umana. L'influenza di Landau era così grande che il suo parere, da quel momento, fece presa sui principali fisici teorici sovietici.

Un intermezzo nucleare

Oppenheimer e Snyder avevano ragione o si sbagliavano? La risposta sarebbe arrivata probabilmente in modo definitivo negli anni Quaranta, se non fossero intervenuti la Seconda Guerra Mondiale e i programmi urgenti per lo sviluppo della bomba all'idrogeno. Ma ci furono entrambi, e la ricerca su questioni esoteriche, prive di sviluppi pratici, come i buchi neri, rimase congelata nel tempo, dato che i fisici dedicarono tutte le loro energie a progettare armi.

Solo alla fine degli anni Cinquanta si cominciarono a dedicare meno energie agli armamenti e l'implosione delle stelle poté riaffacciarsi alla coscienza dei fisici. Solo allora gli scettici lanciarono il loro primo serio attacco alle previsioni di Oppenheimer e Snyder. Alfiere degli scettici, in un primo momento, ma non per molto tempo, fu John Archibald Wheeler. Fin dall'inizio, uno dei principali sostenitori delle loro tesi fu l'omologo sovietico di Wheeler, Yakov Borisovich Zel'dovich.

Il carattere di Wheeler e Zel'dovich si era forgiato nel fuoco della progettazione degli armamenti nucleari durante i quasi vent'anni in cui la ricerca sui buchi neri era rimasta congelata, i decenni degli anni Quaranta e Cinquanta. Dal loro lavoro sugli armamenti Wheeler e Zel'dovich trassero degli strumenti fondamentali per analizzare i buchi neri: delle potenti tecniche di calcolo, una profonda conoscenza delle leggi della fisica, e uno stile interattivo di ricerca in cui stimolavano continuamente i loro colleghi più giovani. Essi portavano con sé anche un difficile bagaglio, una serie di rapporti complessi con alcuni dei loro colleghi fondamentali: Wheeler con Oppenheimer; Zel'dovich con Landau e Andrei Sakharov.

John Wheeler, appena completato il dottorato nel 1933 e avendo vinto una borsa di studio postdoc del National Reasearch Council finanziata da Rockfeller, poteva scegliere dove e con chi effettuare questi studi. Avrebbe potuto optare per Berkeley e Oppenheimer come faceva all'epoca la maggior parte dei post-dottorandi in fisica teorica dell'NRS, invece egli scelse New

York e Gregory Breit. «A livello di personalità [Oppenheimer e Breit] erano estremamente diversi», dice Wheeler. «Oppenheimer vedeva le cose in bianco e nero e amava decidere in fretta. Breit lavorava sulle sfumature di grigio. Attratto dalle questioni che richiedono una lunga riflessione, scelsi Breit».

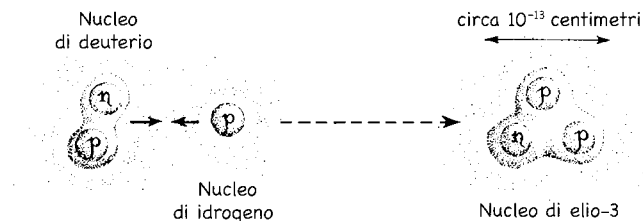
Dall'Università di New York nel 1933, Wheeler si spostò a Copenhagen per studiare con Niels Bohr, poi divenne assistente all'Università del North Carolina, poi a quella di Princeton, nel New Jersey. Nel 1939 mentre Oppenheimer e i suoi studenti studiavano le stelle di neutroni e i buchi neri, Wheeler e Bohr, a Princeton (dove quest'ultimo era visiting professor) stavano elaborando la teoria della *fissione nucleare*: la rottura del nucleo di atomi pesanti come l'uranio in frammenti più piccoli da ottenersi bombardando i nuclei con i neutroni (scheda 6.1). La fissione era stata scoperta in modo quasi inaspettato da Otto Hahn e Fritz Strassmann in Germania, e le sue implicazioni erano inquietanti: innescando una reazione a catena di fissioni si poteva costruire un'arma di potenza mai vista prima. Ma Bohr e Wheeler non si dedicavano alle reazioni a catena o alle armi; essi volevano solo capire come si verifica la fissione. Qual è il meccanismo su cui si fonda? In che modo le leggi della fisica fanno sì che si verifichi?

Bohr e Wheeler ebbero un notevole successo. Essi scoprirono in che modo le leggi della fisica danno luogo alla fissione e stabilirono quali nuclei sarebbero stati più efficaci nel propagare una reazione a catena: l'uranio-235 (che sarebbe diventato il combustibile della bomba che distrusse Hiroshima) e il plutonio-239 (un tipo di nucleo che non esiste in natura, ma che i fisici americani avrebbero presto imparato a creare nei reattori nucleari e che avrebbero usato per alimentare la bomba che distrusse Nagasaki). Ma Bohr e Wheeler non pensavano alle bombe nel 1939, essi volevano soltanto capire.

L'articolo di Bohr e Wheeler che spiegava la fissione nucleare venne pubblicato sullo stesso numero della «Physical Review» che ospitava l'articolo di Oppenheimer e Snyder che descriveva l'implosione di una stella. La data di pubblicazione era il 1° settembre 1939, lo stesso giorno in cui le truppe di Hitler invasero la Polonia dando il via alla Seconda Guerra Mondiale.

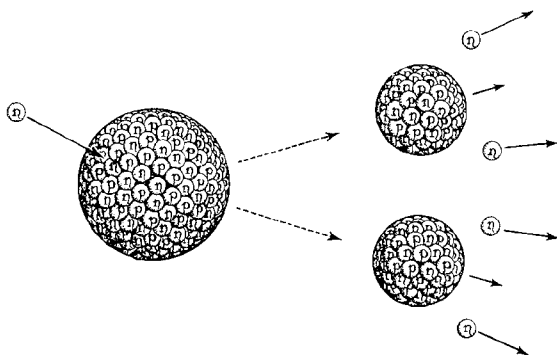
Yakov Borisovich Zel'dovich era nato in una famiglia ebrea a Minsk nel 1914; nel corso di quell'anno la famiglia si trasferì a San Pietroburgo (rinominata Leningrado negli anni Venti e poi tornata all'antico nome negli anni Novanta). Zel'dovich terminò la scuola a quindici anni ma invece di entrare all'università andò a lavorare come assistente di laboratorio all'Istituto fisico-

Scheda 6.1
FUSIONE, FISSIONE E REAZIONI A CATENA

La fusione di nuclei molto leggeri per formare un nucleo di dimensioni medie rilascia una enorme quantità di energia. Un semplice esempio preso dalla scheda 5.3 è la fusione di un nucleo di deuterio («idrogeno pesante», con un protone e un neutrone) e di un comune nucleo di idrogeno (un solo protone) per formare un nucleo di elio-3 (due protoni e un neutrone):

Sono queste reazioni dovute alla fusione a mantenere il Sole caldo e ad alimentare la bomba all'idrogeno (la «superbomba», come veniva chiamata negli anni Quaranta e Cinquanta).
La fissione (o scissione) di un nucleo molto pesante in due nuclei di medie dimensioni rilascia una grande quantità di energia – molta più di quella prodotta da reazioni chimiche (poiché la forza nucleare che governa i nuclei è molto più potente della forza elettromagnetica che governa le reazioni chimiche tra gli atomi), ma molto meno di quella prodotta dalla fusione di nuclei leggeri. Solo pochi nuclei molto pesanti subiscono la fissione naturalmente senza alcun intervento esterno. Più interessante ai fini di questo capitolo sono le reazioni legate alla fissione in cui un neutrone colpisce un

tecnico di Leningrado. Lì imparò tanta di quella fisica e chimica e realizzò una mole di ricerche talmente impressionante che, senza che si fosse laureato ufficialmente, gli venne attribuito il Ph.D. nel 1934, all'età di venti anni.

Nel 1939, mentre Wheeler e Bohr stavano elaborando la teoria della fissione nucleare, Zel'dovich e un suo caro amico, Yuli Borisovich Khariton, stavano sviluppando la teoria delle reazioni a catena prodotte dalla fissione

nucleo molto pesante come l'uranio-235 (un nucleo di uranio con 235 protoni e neutroni) e lo divide grosso modo a metà:

Esistono due nuclei pesanti speciali, l'uranio-235 e il plutonio-239 la cui caratteristica è che la loro fissione non produce solo due nuclei di dimensioni medie, ma anche una manciata di neutroni (come nel disegno qui sopra). Questi neutroni rendono possibile una *reazione a catena.* Se si concentra abbastanza uranio-235 o plutonio-239 in un contenitore abbastanza piccolo, i neutroni rilasciati da una fissione colpiranno altri nuclei di uranio o plutonio spezzandoli e producendo ulteriori neutroni che colpiranno altri nuclei, che a loro volta produrranno più elettroni che spezzeranno altri nuclei e così via. Il risultato di questa reazione a catena, se incontrollata, è un'enorme esplosione (lo scoppio di una bomba atomica), mentre se viene controllata in un reattore il risultato può essere una produzione molto efficiente di energia elettrica.

nucleare: la loro ricerca prendeva spunto da uno stimolante (ma erroneo) suggerimento del fisico francese Francis Perrin, secondo cui le eruzioni vulcaniche potevano essere alimentate da esplosioni nucleari naturali sotterranee che avrebbero dato luogo a una reazione a catena di fissioni di nuclei atomici. Tuttavia, nessuno, Perrin incluso, aveva studiato e descritto nei dettagli una simile reazione a catena. Zel'dovich e Khariton – già tra i principali

esperti mondiali di esplosioni chimiche – colsero la questione al volo. In pochi mesi dimostrarono (come altri fecero parallelamente in Occidente) che una simile esplosione non può verificarsi in natura, perché in natura esiste prevalentemente l'uranio-238 e non abbastanza uranio-235. Tuttavia, era la loro conclusione, se si separasse artificialmente l'uranio-235 e lo si concentrasse, si potrebbe innescare una reazione a catena esplosiva (gli americani avrebbero presto tentato di provocare questa separazione per ottenere il combustibile necessario alla loro bomba destinata a Hiroshima). La cortina della segretezza non era ancora calata sulla ricerca nucleare, e così Zel'dovich e Khariton pubblicarono i loro calcoli sulla più prestigiosa delle riviste di fisica sovietiche: la «Rivista di fisica sperimentale e teorica», affinché tutto il mondo ne venisse a conoscenza.

Durante i sei anni della Seconda Guerra Mondiale, i fisici delle nazioni belligeranti inventarono il sonar, il dragamine, i missili, il radar e la ben più funesta bomba atomica. Oppenheimer diresse il Manhattan Project a Los Alamos, nel Nuovo Messico, destinato a progettare e costruire le bombe americane. Wheeler era il principale scienziato impegnato nella progettazione e nella costruzione del primo reattore nucleare al mondo su scala industriale, a Hanford, Washington, che produsse il plutonio-239 per la bomba fatta esplodere su Nagasaki.

Dopo le stragi causate dai bombardamenti di Hiroshima e Nagasaki e la morte di centinaia di migliaia di persone, Oppenheimer era affranto: «Se le bombe atomiche verranno aggiunte agli arsenali dei Paesi in guerra, o che si preparano alla guerra, l'umanità maledirà il nome di Los Alamos e di Hiroshima». «In un modo molto elementare, che nessuna volgarità, umorismo o esagerazione possono dissolvere, i fisici hanno conosciuto il peccato; e questa è una conoscenza che non possono perdere».

Ma Wheeler aveva il tipo opposto di rimpianto: «Se ripenso [al 1939 e al mio lavoro sulla teoria della fissione insieme a Bohr] provo una grande tristezza. Come è possibile che guardassi alla fissione in primo luogo con gli occhi del fisico [curioso semplicemente di conoscere il funzionamento della fissione] e solo secondariamente con quelli del cittadino [intento a difendere il proprio Paese]? Perché non ci pensavo in primo luogo come cittadino e solo secondariamente come fisico? Basta scorrere i dati per sapere che nella Seconda Guerra Mondiale sono morti tra i venti e i venticinque milioni di persone, e la maggior parte di essi negli ultimi anni anziché nei primi. Ogni mese in meno di guerra avrebbe potuto significare da mezzo milione a un

milione di vite risparmiate. Tra coloro che avrebbero avuto salva la vita ci sarebbe stato mio fratello Joe, caduto nell'ottobre del 1944 nella campagna d'Italia. Che differenza avrebbe fatto, se la data critica [dell'impiego della prima bomba atomica nella guerra] invece del 6 agosto 1945 fosse stata il 6 agosto 1943».

Nell'Urss abbandonarono tutte le ricerche in campo nucleare nel giugno del 1941, quando la Germania attaccò la Russia, perché in altri campi la fisica avrebbe prodotto risultati più immediati per la difesa nazionale. Quando l'esercito tedesco marciò su Leningrado e la circondò, Zel'dovich e il suo amico Khariton vennero evacuati a Kazan, dove lavorarono intensamente sulla teoria dell'esplosione delle bombe ordinarie, cercando di migliorarne il potenziale esplosivo. Poi, nel 1943, vennero convocati a Mosca. Era ormai chiaro, si sentirono dire, che sia gli americani che i tedeschi stavano moltiplicando gli sforzi per costruire una bomba atomica. Essi avrebbero fatto parte di una piccola élite incaricata di sviluppare una bomba sovietica, sotto la direzione di Igor V. Kurchatov.

Due anni dopo, quando gli americani avevano bombardato Hiroshima e Nagasaki, l'équipe di Kurchatov aveva maturato una conoscenza teorica approfondita dei reattori nucleari necessari per produrre il plutonio-239 e aveva elaborato diversi possibili progetti di bomba, e Zel'dovich e Khariton erano diventati le guide teoriche del progetto.

Quando Stalin venne a sapere dell'esplosione delle bombe atomiche americane, rimproverò aspramente Kurchatov per la lentezza dell'équipe sovietica. Kurchatov difese i suoi: in mezzo alle devastazioni della guerra e con le sue limitate risorse, l'équipe non poteva procedere più rapidamente. Stalin gli disse furioso che se il bambino non piange la madre non può sapere di cosa ha bisogno. «Chieda tutto ciò che le occorre», ordinò, «nulla verrà rifiutato»; poi pretese un progetto della massima urgenza e senza risparmio di energie per costruire la bomba, un progetto che avrebbe avuto come suprema autorità Lavrenty Pavlovich Beria, il temuto capo della polizia segreta.

L'intensità e la vastità degli sforzi profusi da Beria sono difficili da immaginare. Egli destinò ai lavori forzati milioni di cittadini sovietici prelevati dai campi di prigionia di Stalin. Questi *zek*, come venivano chiamati in modo colloquiale, scavarono miniere di uranio, costruirono impianti per la sua purificazione, reattori nucleari, centri per la ricerca teorica, centri di collaudo delle armi e cittadine autosufficienti che offrissero supporto a questi impianti. Gli impianti sparsi per tutto il Paese erano protetti da misure di sicurezza

sconosciute al Manhattan Project americano. Zel'dovich e Khariton vennero trasferiti in uno di questi impianti, in «un posto molto lontano» di cui fino al 1990[1] è stato proibito ai cittadini sovietici di rivelare l'ubicazione, pur essendo quasi certamente nota alle autorità occidentali fin dalla fine degli anni Cinquanta. L'impianto era noto semplicemente come l'*Obyekt* («l'Installazione»); Khariton ne divenne il direttore e Zel'dovich passò a dirigere una delle sue équipe principali incaricate della progettazione della bomba. Sotto l'autorità di Beria, Kurchatov mise in piedi diverse équipe di fisici che dovevano seguire in parallelo e in modo del tutto indipendente ogni aspetto del progetto relativo alla bomba; la ridondanza dà sicurezza. Le équipe dell'Installazione sottoponevano i problemi legati alla progettazione ad altre équipe, compresa una di piccole dimensioni diretta da Lev Landau presso l'Istituto per i problemi di fisica a Mosca.

Mentre questo massiccio sforzo procedeva inesorabilmente, le spie sovietiche avevano ottenuto attraverso Klaus Fuchs (un fisico inglese che aveva lavorato al progetto americano della bomba) il progetto della bomba al plutonio americana. Esso differiva un po' da quello elaborato da Zel'dovich e dai suoi colleghi, così Kurchatov, Khariton e gli altri si trovarono a dover prendere una decisione ardua: erano sottoposti alla terribile pressione di Stalin e Beria che chiedevano risultati, e temevano le conseguenze cui sarebbero andati incontro se il test della bomba si fosse rivelato un fallimento, in un'epoca in cui un insuccesso spesso portava all'esecuzione; sapevano che il progetto americano aveva funzionato ad Alamogordo e a Nagasaki, ma non potevano essere del tutto sicuri del loro progetto, e possedevano plutonio sufficiente per una sola bomba. La decisione era evidente, ma dolorosa: congelarono il loro progetto[2] e usarono quello americano per il loro programma d'urgenza.

Alla fine, il 29 agosto 1949, dopo quattro anni di sforzi intensivi, di indicibili sofferenze, di innumerevoli morti tra i lavoratori forzati, e l'inizio di un accumulo di scorie provenienti dai reattori nucleari nei pressi di Cheliabinsk che sarebbero esplose dieci anni dopo contaminando centinaia di chilometri quadrati di terreno, il programma d'urgenza diede i suoi frutti. La prima bomba atomica sovietica fu fatta esplodere vicino Semipalatinsk, nell'Asia sovietica, in un test cui assistettero il Comando supremo dell'esercito sovietico e i leader del governo.

Il 3 settembre 1949 un velivolo WB-29 americano per la ricognizione meteorologica, in un volo di routine tra il Giappone e l'Alaska, rilevò elementi provenienti dalla fissione nucleare del test sovietico. I dati vennero sottoposti

per una valutazione a un comitato di esperti, di cui faceva parte anche Oppenheimer. Il verdetto era inequivocabile. I russi avevano testato una bomba atomica!

Nel panico che ne seguì (rifugi antiatomici nel giardino di casa; esercitazioni in caso di attacco nucleare per i bambini delle scuole; la «caccia alle streghe» di McCarthy per espellere le spie, i comunisti e i loro compagni di strada dal governo, dall'esercito, dai media e dalle università), si sviluppò un profondo dibattito tra i fisici e i politici. Edward Teller, uno dei più innovativi tra i fisici che avevano progettato la bomba atomica americana, invocò l'adozione di un programma urgente per la progettazione e la costruzione della «superbomba» (o «bomba all'idrogeno»), un'arma basata sulla fusione dei nuclei di idrogeno per formare elio. La bomba all'idrogeno, se fosse stato possibile costruirla, sarebbe stata terrificante. Sembrava non esserci limite alla sua potenza. Si voleva una bomba dieci volte più potente di quella di Hiroshima, cento, mille, un milione di volte più potente? Se si era in grado di realizzarla, poteva essere potente quanto si desiderava.

John Wheeler appoggiò Teller: un programma d'urgenza per la «superbomba» era essenziale per contrastare la minaccia sovietica, egli riteneva. Robert Oppenheimer e il suo Comitato consultivo generale presso la Commissione per l'energia atomica degli Stati Uniti, erano contrari. Non era affatto evidente che una superbomba come era allora concepita potesse mai funzionare, affermarono Oppenheimer e il suo Comitato. Inoltre, anche se avesse funzionato, qualsiasi superbomba che fosse stata enormemente più potente di una comune bomba atomica sarebbe stata troppo pesante per essere trasportata con un aeroplano o un razzo. Poi vi erano gli aspetti etici, che Oppenheimer e il suo Comitato esplicitarono nel modo seguente: «Basiamo le nostre raccomandazioni [contrarie a un programma d'urgenza] sulla convinzione che gli estremi pericoli per l'umanità insiti nella proposta superino qualsiasi vantaggio militare ottenibile grazie alla sua realizzazione. Deve essere chiaro che si tratta di una superarma, di una categoria completamente diversa da una bomba atomica. Il motivo per sviluppare una simile arma sarebbe quello di devastare un'area molto estesa con una sola bomba. Il suo impiego comporterebbe la decisione di massacrare un ingente numero di civili. Siamo allarmati dai possibili effetti globali della radioattività generata dall'esplosione di alcune superbombe di grandezza concepibile. Qualora le superbombe possano mai funzionare, non vi è un limite intrinseco alla potenza distruttiva di cui potrebbero essere dotate. Pertanto, una superbomba potrebbe diventare uno strumento di genocidio».

Per Edward Teller e John Wheeler questi argomenti non avevano alcun senso. I russi avrebbero certamente proceduto a fabbricare la bomba all'idrogeno, e se l'America non faceva altrettanto, essi ritenevano, il mondo libero avrebbe corso un enorme pericolo.

La posizione di Teller e Wheeler prevalse. Il 10 marzo 1950 il presidente Truman ordinò l'avvio di un programma d'urgenza per sviluppare la superbomba.

Il progetto americano di una superbomba del 1949, a posteriori, sembrava una ricetta per il fallimento, proprio come il Comitato di Oppenheimer sospettava. Tuttavia, siccome non vi era la certezza che fallisse e non si conosceva niente di meglio, il programma venne perseguito intensivamente fino al marzo del 1951, quando Teller e Stanislaw Ulam inventarono un progetto radicalmente nuovo e molto promettente.

L'invenzione di Teller e Ulam all'inizio era solo un'idea per un progetto. Come aveva detto Hans Bethe: «Delle idee di Teller, nove su dieci sono inutili. Ha bisogno di persone di maggior giudizio, anche se meno dotate, per scegliere la decima idea, che spesso è un colpo di genio». Per verificare se quest'idea era un colpo genio o un deludente bidone, bisognava trasformarla in un concreto e dettagliato progetto di bomba, quindi effettuare una mole voluminosa di calcoli sui più grandi computer disponibili per vedere se poteva funzionare e poi, se i calcoli davano esito favorevole, costruire e testare una vera bomba.

Vennero costituite due équipe per effettuare i calcoli, una a Los Alamos e l'altra presso l'Università di Princeton. John Wheeler guidava l'équipe di Princeton. L'équipe di Wheeler lavorò giorno e notte per parecchi mesi per elaborare un progetto completo di bomba basato sull'idea di Teller e Ulam e per verificare al computer se avrebbe potuto funzionare. Come ricorda Wheeler: «Svolgemmo una quantità immensa di calcoli. Usavamo i centri informatici di New York, Philadelphia e Washington, in effetti una frazione molto ampia della capacità informatica degli Stati Uniti. Larry Wilets, John Toll, Ken Ford, Louis Henyey, Carl Hausman, Dick L'Olivier e altri lavoravano ogni giorno per tre turni di sei ore per far marciare le cose.

Quando i calcoli indicarono che l'idea di Teller e Ulam avrebbe probabilmente funzionato, venne convocata una riunione presso l'Istituto per gli studi avanzati di Princeton (che era diretto da Oppenheimer) per illustrare l'idea al Comitato consultivo generale di Oppenheimer e alla Commissione per l'energia atomica degli Stati Uniti. Teller illustrò l'idea e poi Wheeler presentò il progetto specifico della sua équipe e l'esplosione che ne sarebbe

seguita. Come ricorda Wheeler: «Stavo per iniziare il mio intervento quando Ken Ford si precipitò alla finestra dall'esterno, la sollevò e mi passò questo grande grafico. Lo srotolai e lo appesi alla parete; mostrava la successione delle fasi della combustione termonucleare [così come l'avevamo calcolata]... Il Comitato non ebbe altra scelta che concludere che la cosa aveva senso... I nostri calcoli fecero cambiare idea a Oppie sul progetto».

Oppenheimer stesso ha descritto la sua reazione: «Il programma del 1949 [la "ricetta per il fallimento"] era una cosa contorta della quale era facile sostenere che aveva poco senso sul piano tecnico. E poi uno poteva anche so-

Una parte dell'équipe di John Wheeler che progettò la bomba all'idrogeno all'Università di Princeton nel 1952. *Prima fila, da sinistra a destra*: Margaret Fellows, Margaret Murray, Dorothea Reiffel, Audrey Ojala, Christene Shack, Roberta Casey. *Seconda fila*: Walter Aron, William Clendenin, Solomon Bochner, John Toll, John Wheeler, Kenneth Ford. Terza e quarta fila: David Layzer, Lawrence Wilets, David Carter, Edward Frieman, Jay Berger, John McIntosh, Ralph Pennington, una persona non identificata, Robert Goerss. [Fotografia di Howard Schrader; per gentile concessione di Lawrence Wilets e John A. Wheeler].

stenere di non volerla nemmeno se era possibile averla. Il programma del 1952 [il nuovo progetto basato sull'idea di Teller e Ulam] filava così liscio sul piano tecnico che non si poteva dire nulla a riguardo. La questione ora erano solo i problemi puramente militari, politici e umanitari di cosa ne avremmo fatto, una volta che l'avessimo avuta». Mettendo a tacere i suoi profondi timori legati agli aspetti etici, Oppenheimer e gli altri membri del suo Comitato serrarono le fila con Teller, Wheeler e gli altri proponenti della superbomba, e il progetto per la sua costruzione e sperimentazione andò avanti a un ritmo accelerato. Funzionò, come avevano previsto i calcoli combinati dell'équipe di Wheeler e di un'altra équipe che collaborava con loro a Los Alamos.

Gli ampi calcoli di progettazione dell'équipe di Wheeler vennero infine riordinati e trascritti come il progetto segreto *Project Matterhorn Division B Report 31*, o PMB-31. «Mi è stato detto», dice Wheeler, «che per almeno dieci anni il PMB-31 è stato la Bibbia della progettazione dei dispositivi termonucleari (le bombe all'idrogeno)».

Nel 1949-1950, mentre l'America era nel panico e Oppenheimer, Teller e altri discutevano se l'America dovesse mettere su un programma d'urgenza per sviluppare la superbomba, l'Unione Sovietica era già nel pieno di un progetto analogo.

Nella primavera del 1948, quindici mesi prima del test della prima bomba atomica sovietica, Zel'dovich e la sua équipe dell'Installazione avevano effettuato i calcoli teorici relativi a un progetto di superbomba simile a quello della «ricetta per il fallimento» americana[3]. Nel giugno del 1948 una seconda équipe si mise al lavoro sulla superbomba a Mosca sotto la direzione di Igor Tamm, uno dei più eminenti fisici teorici sovietici. I suoi membri erano Vitaly Ginzburg (di cui parleremo molto nei capitoli VIII e X), Andrei Sakharov (che sarebbe diventato un dissidente negli anni Settanta, e poi un eroe e un'icona sovietica alla fine degli anni Ottanta e negli anni Novanta), Semyon Belen'ky e Yuri Romanov. L'équipe di Tamm aveva il compito di controllare e affinare i calcoli di progettazione dell'équipe di Zel'dovich.

L'atteggiamento dell'équipe di Tamm verso questo compito è esemplificata da un'affermazione fatta all'epoca da Belen'ky: «Il nostro lavoro consiste nel leccare il culo a Zel'dovich». Zel'dovich, con la sua paradossale combinazione di personalità energica ed esigente e di estrema timidezza politica *non era* tra i fisici sovietici più popolari. Ma *era* tra i più brillanti. Landau, che in quanto direttore di una piccola équipe complementare di progetta-

zione riceveva occasionalmente dall'équipe di Zel'dovich l'ordine di analizzare questo o quest'altro aspetto della progettazione della bomba, a volte, alle sue spalle lo chiamava «quella troia di Zel'dovich». Zel'dovich, invece, venerava Landau come il massimo giudice della correttezza delle idee nel campo della fisica e come uno dei suoi principali maestri, malgrado non avesse mai studiato ufficialmente con lui.

Bastarono pochi mesi a Sakharov e Ginzburg, nell'équipe di Tamm, per mettere a punto un progetto di superbomba assai migliore della «ricetta per il fallimento» cui Zel'dovich e gli americani si stavano dedicando. Sakharov propose di costruire la bomba come una torta a strati alterni di combustibile pesante per la fissione (uranio) e di combustibile leggero, e Ginzburg propose come combustibile per la fusione il deuterato di litio (LiD). Nell'intensa esplosione della bomba, i nuclei di litio del LiD, nella fissione, si sarebbero scissi in nuclei di trizio ed elio, e il trizio si sarebbe poi fuso con il deuterio del LiD per formare dei nuclei di elio, rilasciando quantità enormi di energia. L'uranio pesante avrebbe rafforzato l'esplosione impedendo alla sua energia di disperdersi troppo rapidamente, contribuendo a comprimere il combustibile della fusione e aggiungendo l'energia della fissione a quella della fusione. Quando Sakharov presentò queste idee, Zel'dovich comprese immediatamente il loro potenziale. Gli sforzi sovietici per costruire la superbomba si concentrarono rapidamente sulla torta a strati di Sakharov e sul LiD di Ginzburg.

Per far progredire più rapidamente la superbomba, a Sakharov, Tamm, Belen'ky e Romanov venne ordinato di trasferirsi da Mosca all'Installazione. Ma non a Ginzburg. La ragione appare ovvia: tre anni prima Ginzburg aveva sposato Nina Ivanovna, una donna vivace e brillante che agli inizi degli anni Quaranta era stata messa in prigione con la falsa accusa di aver complottato per uccidere Stalin. Lei e gli altri supposti cospiratori avrebbero progettato di sparare a Stalin da una finestra della stanza in cui lei abitava mentre egli passava nella sottostante via Arbat. Quando una corte composta da tre giudici si riunì per decidere il suo destino, venne loro fatto notare che nessuna finestra della sua stanza dava su via Arbat, e così, in una insolita manifestazione di clemenza, le venne risparmiata la vita e venne semplicemente condannata alla reclusione e poi all'esilio, ma non alla morte. La sua incarcerazione e l'esilio erano probabilmente sufficienti a rendere Ginzburg, l'inventore del LiD come combustibile della bomba, sospetto e a tenerlo fuori dall'Installazione. Ginzburg, che preferiva la ricerca fisica di base alla progettazione delle bombe, ne fu ben contento, e il mondo della scienza ne raccolse

i frutti. Mentre Zel'dovich, Sakharov e Wheeler si concentravano sulla bomba, Ginzburg risolse il mistero dei raggi cosmici che si propagano attraverso la nostra galassia, e insieme a Landau utilizzò le leggi della meccanica quantistica per spiegare l'origine della superconduttività.

Nel 1949, mentre il progetto sovietico della bomba atomica giungeva a compimento, Stalin ordinò che tutte le risorse dello Stato venissero impiegate, senza soste, nella costruzione di una superbomba. I lavori forzati degli zek, i centri per la ricerca teorica, le fabbriche, i centri sperimentali, le molteplici équipe di fisici impegnate su qualsiasi aspetto della progettazione e della costruzione, dovevano concentrarsi sul tentativo di battere gli americani sulla bomba all'idrogeno. Di questo gli americani, nel pieno delle discussioni sull'opportunità o meno di avviare un programma urgente per la superbomba, non sapevano nulla. Tuttavia, essi possedevano una tecnologia superiore e partivano con un ampio vantaggio.

Il 1° novembre 1952 gli americani fecero esplodere un ordigno simile a una bomba all'idrogeno, cui fu dato il nome in codice *Mike*. Scopo di Mike era sperimentare l'invenzione di Teller e Ulam del 1951 ed esso si basava sui calcoli di progettazione dell'équipe di Wheeler in collaborazione con quella di Los Alamos. Il combustibile principale impiegato era deuterio liquido. Per rendere liquido il deuterio e convogliarlo verso l'area dell'esplosione, occorreva un apparato enorme simile a una fabbrica. Quindi, non era il tipo di bomba che si poteva trasportare con un qualsiasi aeroplano o con un razzo. Ciononostante, distrusse completamente l'isola di Elugelab, nell'atollo di Eniwetok nell'Oceano Pacifico. Era ottocento volte più potente della bomba che aveva ucciso centomila persone a Hiroshima.

Il 5 marzo 1953, Radio Mosca diede l'annuncio, accompagnato da un sottofondo musicale triste, della morte di Stalin. Ciò provocò sollievo in America, e lutto in Unione Sovietica. Andrei Sakharov scrisse alla moglie Klava: «Sono colpito dalla morte di un grande uomo. Penso alla sua umanità».

Il 12 agosto 1953, a Semipalatinsk, i sovietici fecero esplodere la loro prima bomba all'idrogeno. Battezzata *Joe-4* dagli americani, era basata sul progetto di torta a strati di Sakharov e sul LiD di Ginzburg come combustibile per la fusione, ed era abbastanza piccola da poter essere trasportata da un aeroplano. Tuttavia, il combustibile all'interno della Joe-4 non veniva incendiato con il metodo di Teller e Ulam e, di conseguenza, era alquanto meno potente della Mike degli americani: equivaleva «solo» a trecento bombe di Hiroshima, contro le ottocento di Mike.

In effetti, nel linguaggio dei fisici americani impegnati nella progettazione della bomba, non era affatto una bomba all'idrogeno, ma una bomba atomica potenziata, ossia una bomba atomica la cui potenza è rafforzata dall'aggiunta di un qualche combustibile di fusione. Bombe atomiche potenziate come questa facevano già parte dell'arsenale degli Stati Uniti, e gli americani si rifiutarono di considerarle come bombe all'idrogeno, perché la loro progettazione a strati non consentiva di incendiare una quantità *arbitraria* di combustibile di fusione. Quel progetto non poteva in alcun modo diventare un'«arma apocalittica» migliaia di volte più potente di quella di Hiroshima. Ma trenta volta Hiroshima non era da buttar via, e nemmeno la sua trasportabilità. Joe-4 invece era un'arma terrificante e Wheeler e altri americani tirarono un sospiro di sollievo poiché, grazie alla loro autentica superbomba, il nuovo leader sovietico, Georgi Malenkov, non poteva usare la sua per minacciare l'America.

Il 1° marzo 1954 gli americani fecero esplodere la loro prima superbomba trasportabile alimentata a LiD. Il suo nome in codice era *Bravo* e come Mike si basava sui calcoli di progettazione delle équipe di Wheeler e di Los Alamos e utilizzava l'invenzione di Teller e Ulam. L'energia dell'esplosione era pari a milletrecento volte quella di Hiroshima.

Nel marzo del 1954, Sakharov e Zel'dovich inventarono insieme (indipendentemente dagli americani) quella che era l'idea di Teller e Ulam, ed entro pochi mesi le risorse sovietiche vennero concentrate sulla sua applicazione in un'autentica superbomba dotata di qualsiasi potenza distruttiva si desiderasse. Occorsero solo diciotto mesi per progettarla e costruirla. Il 23 novembre 1955 venne fatta esplodere; aveva un'energia pari a trecento volte quella di Hiroshima.

Come aveva sospettato il Comitato consultivo generale di Oppenheimer, quando si era opposto al programma d'urgenza per la superbomba, queste bombe di enorme potenza – la gigantesca bomba cinquemila volte più potente di quella di Hiroshima fatta esplodere successivamente dai sovietici nel tentativo di intimidire John Kennedy – non erano molto attraenti per l'establishment militare degli Stati Uniti né per quello dell'Urss. Le armi attualmente presenti negli arsenali russi e americani hanno una potenza di circa trenta volte, non migliaia di volte, quella di Hiroshima. Malgrado siano delle vere bombe all'idrogeno non sono molto più potenti di una grande bomba atomica. I militari non avevano bisogno né desideravano un'arma «apocalittica». Il suo utilizzo avrebbe costituito un'intimidazione psicologica nei confronti dell'avversario, ma l'intimidazione può essere un affare serio in un mondo in cui ci sono leader come Stalin.

Il 2 luglio 1953 Lewis Strauss, un membro della Commissione per l'energia atomica che aveva avuto un'aspra disputa con Oppenheimer sulla superbomba, divenne presidente della Commissione. Uno dei suoi primi atti fu quello di ordinare il sequestro di tutti i documenti segreti conservati nell'ufficio di Oppenheimer a Princeton. Strauss e molti altri a Washington nutrivano gravi sospetti sulla lealtà di Oppenheimer. Come poteva un uomo leale all'America opporsi al progetto della superbomba come aveva fatto lui prima che l'équipe di Wheeler dimostrasse che l'invenzione di Teller e Ulam funzionava? William Borden, che era stato consigliere capo del Comitato congiunto del Congresso sull'energia atomica durante il dibattito sulla superbomba, scrisse una lettera a J. Edgar Hoover in cui tra l'altro diceva: «Scopo di questa lettera è esprimere la mia a lungo ponderata opinione, basata su anni di studi dei documenti segreti disponibili, secondo cui con ogni probabilità J. Robert Oppenheimer è un agente dell'Unione Sovietica». Il nulla osta di sicurezza di Oppenheimer venne revocato, e nell'aprile e nel maggio del 1954, simultaneamente ai primi test americani sulle bombe all'idrogeno trasportabili, la Commissione per l'energia atomica tenne delle udienze per stabilire se Oppenheimer rappresentasse o meno un rischio per la sicurezza.

Wheeler all'epoca delle udienze si trovava a Washington per altre faccende, e non vi era coinvolto in alcun modo. Tuttavia, Teller, suo amico personale, andò a trovarlo in albergo la notte prima della sua testimonianza, e camminò per ore su e giù per la stanza. Se avesse detto quello che realmente pensava, Teller avrebbe seriamente danneggiato Oppenheimer. Ma come avrebbe potuto non dirlo? Wheeler non aveva dubbi; la sua integrità avrebbe costretto Teller a rendere piena testimonianza.

Wheeler aveva ragione. Il giorno dopo Teller, abbracciando un punto di vista che Wheeler comprendeva, disse: «In molti casi ho visto il dottor Oppenheimer agire... in un modo per me estremamente difficile da comprendere. Mi sono trovato in completo disaccordo con lui su numerose questioni, e le sue azioni mi sono sinceramente apparse confuse e complicate. Credo pertanto che preferirei vedere gli interessi vitali del Paese nelle mani di qualcuno che potrei comprendere meglio, e verso cui potrei quindi nutrire maggiore fiducia... Ho l'impressione, ma si tratta di una pura impressione, non basata sull'esperienza né su informazioni concrete, che la personalità del dottor Oppenheimer sia tale per cui egli non farebbe mai coscientemente e volontariamente qualcosa che potrebbe mettere a rischio la sicurezza di questo Paese. Nella misura in cui, pertanto, la vostra domanda riguarda le intenzioni, direi che non vedo alcuna ragione per negargli il nulla osta. Se si

Scheda 6.2
PERCHÉ I FISICI SOVIETICI COSTRUIRONO LA BOMBA PER STALIN?

Perché Zel'dovich, Sakharov e altri grandi fisici sovietici lavorarono così duramente per costruire bombe atomiche e all'idrogeno per Josif Stalin? Stalin si rese responsabile della morte di milioni di cittadini sovietici: sei o sette milioni di contadini e kulaki durante la collettivizzazione forzata dei primi anni Trenta; due milioni e mezzo fra gli alti livelli dell'esercito, del governo e della società durante il Grande Terrore del 1937-1939; dieci milioni, appartenenti a tutti gli strati sociali, nelle prigioni e nei campi di lavoro tra gli anni Trenta e gli anni Cinquanta. Come poteva un fisico, in tutta coscienza, mettere l'arma *definitiva* nelle mani di un uomo così *malvagio*?
Chi si pone simili domande dimentica o ignora le condizioni fisiche e psicologiche che predominavano nell'Unione Sovietica alla fine degli anni Quaranta e agli inizi degli anni Cinquanta:

1. L'Unione Sovietica era appena uscita dalla più sanguinosa e devastante guerra della sua storia, una guerra in cui l'aggressore tedesco aveva ucciso ventisette milioni di cittadini sovietici e aveva saccheggiato il Paese, quando Winston Churchill lanciò una delle prime bordate della Guerra Fredda. In un discorso del 5 marzo 1946 a Fulton, Missouri, Churchill mise in guardia l'Occidente dalla minaccia sovietica e coniò il termine «cortina di ferro» per descrivere i confini che Stalin aveva stabilito attorno al suo impero. La macchina propagandistica di Stalin sfruttò al massimo il discorso di Churchill, creando nei cittadini sovietici il profondo e diffuso timore che gli inglesi e gli americani potessero attaccare. Gli americani, affermava la propaganda*, stavano progettando una guerra nucleare contro l'Unione Sovietica, con centinaia di bombe atomiche che sarebbero state lanciate dagli aeroplani su centinaia di città sovietiche. La maggior parte dei fisici del Paese credette alla propaganda e all'assoluta necessità per l'Urss di dotarsi di armi nucleari per proteggersi da una nuova devastazione come quella hitleriana.

* A partire dal 1945, infatti, la pianificazione strategica americana aveva incluso un'opzione – se l'Urss avesse avviato una guerra convenzionale – per un massiccio attacco nucleare sulla città sovietiche e su obiettivi militari e industriali. Si veda Brown (1978).

2. L'apparato dello Stato staliniano era così efficace nel controllare l'informazione e fare il lavaggio del cervello perfino agli scienziati più eccellenti che pochi di essi compresero la malvagità di quell'uomo. Stalin era venerato dalla maggior parte dei fisici (Sakharov compreso), come dalla maggior parte dei cittadini sovietici, come il Grande Leader, un dittatore severo ma benevolo che era stato l'artefice della vittoria sulla Germania e che avrebbe protetto il suo popolo da un mondo ostile. I fisici sovietici erano tristemente consapevoli della malvagità che dominava a livelli inferiori di governo: la più inconsistente delle denunce da parte di persone pressoché sconosciute poteva far finire qualcuno in prigione, e spesso provocarne la morte (alla fine degli anni Sessanta Zel'dovich rievocò a mio beneficio la situazione: «La vita è meravigliosa oggi», disse, «non vengono più a bussarti alla porta nel cuore della notte, e gli amici non spariscono per non riapparire mai più»). Ma la fonte di questa malvagità, riteneva la maggior parte dei fisici, non poteva essere il Grande Leader, doveva trovarsi a qualche livello inferiore (Landau sapeva meglio come stavano le cose, aveva imparato molto in prigione, ma psicologicamente distrutto dalla prigionia, raramente parlava delle colpe di Stalin, e quando lo faceva gli amici non gli credevano).
3. Pur vivendo nella paura, l'informazione era così strettamente controllata che non era possibile immaginare l'enormità del tributo che Stalin aveva imposto. Essa sarebbe stata svelata solo ai tempi della *glasnost* di Gorbacev, alla fine degli anni Ottanta.
4. Molti fisici sovietici erano «fatalisti». Non pensavano affatto a tali questioni. La vita era così dura che ci si limitava a cercare di sopravvivere, e a fare al meglio il proprio lavoro, qualunque cosa fosse. Inoltre, la sfida tecnica di immaginare come costruire una bomba che funzionasse era affascinante, e il cameratismo che regnava nell'équipe di progettazione, il prestigio, la notevole remunerazione che procurava il lavoro, erano confortanti.

tratta di saggezza e di giudizio, come dimostrato dagli atti compiuti dal 1945 in poi, allora direi che sarebbe più saggio non concederglielo».

Quasi tutti gli altri fisici che testimoniarono espressero in modo inequivocabile il loro sostegno a Oppenheimer, e rimasero scioccati dalla testimonianza di Teller. Ciononostante, e malgrado l'assenza di prove credibili che

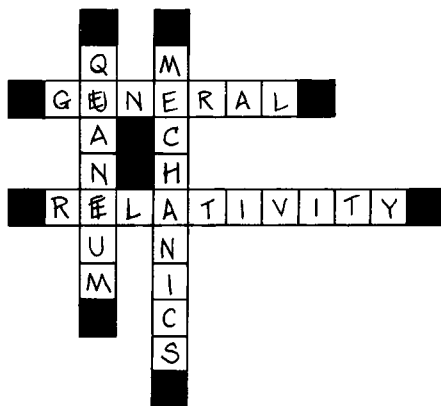
dimostrassero che Oppenheimer era «un agente dell'Unione Sovietica», il clima dell'epoca prevalse: Oppenheimer venne dichiarato un rischio per la sicurezza e non gli venne restituito il nulla osta di sicurezza.

Per la maggior parte dei fisici americani Oppenheimer divenne immediatamente un martire, e Teller un infame. Teller sarebbe stato ostracizzato dalla comunità dei fisici per il resto della sua vita. Ma per Wheeler il martire era lui; a suo giudizio, Teller aveva «avuto il coraggio di esprimere il suo onesto parere, mettendo la sicurezza del Paese davanti alla solidarietà verso la comunità dei fisici». Una tale testimonianza, secondo Wheeler, «meritava considerazione», non ostracismo. Andrei Sakharov, trentacinque anni dopo, si disse d'accordo con lui[4].

La nascita dei buchi neri: una conoscenza più profonda

Wheeler e Oppenheimer non solo dissentivano profondamente sulle questioni legate alla sicurezza nazionale, ma differivano anche notevolmente nell'approccio alla fisica teorica. Mentre Oppenheimer si atteneva strettamente alle previsioni delle leggi fisiche consolidate, Wheeler era animato da un più profondo desiderio di conoscere cosa c'era al di là di quelle leggi. Con la mente egli si rivolgeva di continuo verso ambiti in cui le leggi conosciute perdono validità e ne entrano in gioco di nuove. Egli cercò di aprirsi una strada verso il XXI secolo per dare uno sguardo a come avrebbero potuto essere le leggi della fisica oltre le frontiere del XX secolo.

Di tutti i luoghi in cui si poteva gettare uno sguardo del genere, nessuno sembrava a Wheeler più promettente, a partire dagli anni Cinquanta, del punto di contatto tra la relatività generale (il campo del macroscopico) e la meccanica quantistica (il campo del microscopico). La relatività generale e la meccanica quantistica non si incastrano in un modo coerente dal punto di vista logico. Erano come le righe e le colonne di un cruciverba che si iniziava a cercare di risolvere. Si dispone di una serie di possibili parole scritte verticalmente sulle colonne e di altre possibili parole scritte orizzontalmente sulle righe e si scoprono delle incoerenze logiche in alcuni punti di intersezione tra le righe e le colonne: dove la parola orizzontale «relatività» richiede una «i», la parola verticale «quantistica» richiede una «t»; dove la parola orizzontale «generale» richiede una «e» la parola verticale «meccanica» richiede una «i». Osservando le righe e le colonne è evidente che per ottenere un risultato coerente occorre modificare una delle due, o entrambe. Analo-

gamente, osservando le leggi della relatività generale e le leggi della meccanica quantistica era ovvio che le une, le altre o entrambe andavano modificate per renderle compatibili tra loro. Se fosse stato possibile ottenere una simile compatibilità, l'unione che sarebbe risultata tra relatività generale e meccanica quantistica avrebbe prodotto un nuovo, potente corpus di leggi che i fisici chiamavano *gravità quantistica*. Tuttavia, le idee che i fisici avevano riguardo al modo di combinare la relatività generale con la meccanica quantistica negli anni Cinquanta erano talmente primitive che, malgrado i tanti sforzi, nessuno riusciva a ottenere grandi progressi.

Anche i tentativi di comprendere gli elementi fondamentali dei nuclei atomici – il neutrone, il protone, l'elettrone e la pletora di altre *particelle elementari* che venivano create negli acceleratori di particelle – procedevano lentamente.

Wheeler sognava di saltare quest'impasse e di cogliere simultaneamente qualche barlume sulla natura della gravità quantistica e su quella delle particelle elementari. Un barlume del genere si poteva forse cogliere, egli pensava, esaminando quei settori della fisica teorica in cui abbondavano i paradossi. Risolvere un paradosso procura una maggiore conoscenza. Più grande era il paradosso, maggiori erano le probabilità che la sua comprensione conducesse a scoperte al di là dei confini del XX secolo.

Era con questo spirito che, appena uscito dalle frenetiche attività legate alla superbomba, Wheeler, con Harrison e Wakano, colmò le lacune che esistevano nella nostra conoscenza delle stelle fredde e morte (capitolo V); ed

era sempre con questo spirito che Wheeler contemplava il conseguente «destino delle grandi masse». Qui vi era un grande paradosso proprio del tipo di cui Wheeler era alla ricerca: nessuna stella fredda e morta può avere una massa superiore a quella di due masse solari, eppure i cieli sembrano abbondare di stelle calde dalla massa assai superiore, stelle che un giorno dovranno raffreddarsi e morire. Oppenheimer, con il suo approccio ordinario, aveva chiesto alle leggi della fisica cosa accade a tali stelle e aveva ottenuto (assieme a Snyder) una risposta che appariva bizzarra a Wheeler. Ciò rinforzava la sua convinzione che in quell'ambito, nel destino delle grandi masse, avrebbe potuto cogliere un barlume della fisica che stava al di là dei limiti del XX secolo. Wheeler aveva ragione, come vedremo nei capitoli XII e XIII.

Wheeler era animato da un ardente desiderio, un bisogno profondo e irrinunciabile di conoscere il destino delle grandi masse e di scoprire se esso poteva svelare i misteri della gravità quantistica e delle particelle elementari. A Oppenheimer, invece, nel 1958 non sembrava importare molto. Egli credeva ai calcoli effettuati insieme a Snyder, ma non mostrava alcuna necessità di spingersi oltre, nessuna spinta verso una conoscenza più profonda. Forse era stanco a causa delle intense battaglie dei due decenni precedenti, quelle per progettare armamenti, quelle politiche e quelle personali. Forse era intimidito dai misteri dell'ignoto. In ogni caso, non avrebbe più fornito risposte. La torcia passava alle nuove generazioni. L'eredità di Oppenheimer sarebbe stata la base di Wheeler, come nell'Urss l'eredità di Landau lo sarebbe stata per Zel'dovich.

Nel 1958, nel suo confronto con Oppenheimer, Wheeler affermò che i calcoli di Oppenheimer e Snyder non erano affidabili. Perché? A causa delle loro eccessive semplificazioni (si veda la figura 6.3). In particolare, Oppenheimer aveva fatto finta fin dall'inizio che le stelle in fase di implosione fossero prive di qualsiasi pressione. Senza pressione, era impossibile che il materiale che implodeva formasse delle onde d'urto (analoghe alle onde dell'oceano che si infrangono e formano la schiuma). Senza pressione e onde d'urto non era possibile che il materiale in implosione si riscaldasse. Senza calore e senza pressione non era possibile che si innescassero reazioni nucleari e venissero emesse radiazioni. Senza l'emissione di radiazioni, l'espulsione all'esterno di materiale a causa delle reazioni nucleari, della pressione e delle onde d'urto, non vi era modo per la stella di perdere massa. Se la perdita di massa era impossibile fin dall'inizio, non vi era modo per una stella massiva di ridursi al di sotto di due masse solari e diventare una fredda,

morta stella di neutroni. Nessuna sorpresa, rifletteva Wheeler, che la stella di Oppenheimer, implodendo, diventasse un buco nero; le sue semplificazioni impedivano a essa di diventare qualsiasi altra cosa!

Nel 1939, quando Oppenheimer e Snyder avevano realizzato il loro lavoro, calcolare i particolari dell'implosione tenendo conto di una pressione realistica (la pressione termica, la pressione di degenerazione e la pressione prodotta dalla forza nucleare), delle reazioni nucleari, delle onde d'urto, del calore, delle radiazioni e dell'espulsione della massa, era un compito senza speranza. Tuttavia, le attività di progettazione degli armamenti nucleari dei venti anni successivi avevano fornito esattamente gli strumenti necessari per farlo. La pressione, le reazioni nucleari, le onde d'urto, il calore, le radiazioni e l'espulsione della massa sono tutti elementi fondamentali per una bomba all'idrogeno; senza di essi la bomba non esploderebbe. Per progettare una bomba bisognava inserire tutti questi dati nei calcoli al computer. L'équipe di Wheeler, naturalmente, lo aveva fatto, perciò ora sarebbe stato naturale riscrivere i programmi informatici in modo da simulare, anziché l'esplosione di una bomba all'idrogeno, l'implosione di una stella massiva.

Sarebbe stato naturale, se l'équipe fosse esistita ancora. Ma essa si era sciolta, i suoi membri avevano scritto il loro rapporto PMB-31 e si erano dispersi, chi a insegnare, chi a svolgere ricerche, chi a dirigere università e laboratori governativi.

La conoscenza maturata con la bomba americana era ormai concentrata a Los Alamos e in un nuovo laboratorio governativo a Livermore, in California. A Livermore, alla fine degli anni Cinquanta, Stirling Colgate rimase affascinato dal problema dell'implosione stellare. Con l'incoraggiamento di Edward Teller e in collaborazione con Richard White e successivamente con Michael May, Colgate si ripromise di simulare un'implosione di questo tipo al computer. Le simulazioni di Colgate,White e May mantennero alcune delle semplificazioni di Oppenheimer: essi partirono dall'ipotesi che la stella fosse sferica e non ruotasse. Senza queste restrizioni, i loro calcoli sarebbero stati enormemente più difficili. Ma le loro simulazioni tenevano conto di tutti gli aspetti che preoccupavano Wheeler – pressione, reazioni nucleari, onde d'urto, calore, radiazioni, espulsione di massa –, e per farlo ricorrevano decisamente alle conoscenze e ai codici sorgente utilizzati per la progettazione della bomba. Il perfezionamento delle simulazioni richiese diversi anni di impegno, ma all'inizio degli anni Sessanta funzionavano in modo soddisfacente.

Un giorno, nei primi anni Sessanta, John Wheeler arrivò trafelato a una lezione sulla relatività all'Università di Princeton alla quale assistevo anch'io

in qualità di studente. Era leggermente in ritardo ma raggiante di soddisfazione. Era appena tornato da una visita a Livermore dove aveva visto i risultati delle più recenti simulazioni di Colgate, White e May. Con la voce che gli vibrava per l'eccitazione, tracciò un diagramma dopo l'altro sulla lavagna spiegando quanto avevano appreso i suoi amici di Livermore.

Quando una stella in fase di implosione aveva una massa piccola, innescava l'esplosione di una supernova e formava una stella di neutroni proprio nel modo ipotizzato da Fritz Zwicky trent'anni prima. Quando la stella aveva una massa molto più grande del massimo di due Soli previsto per una stella di neutroni, l'implosione – malgrado la pressione, le reazioni nucleari, le onde d'urto, il calore e le radiazioni – produceva un buco nero. E la nascita dei buchi neri era notevolmente simile a quella calcolata in modo semplificato quasi venticinque anni prima da Oppenheimer e Snyder. Vista dall'esterno, l'implosione rallentava e rimaneva congelata una volta raggiunta la circonferenza critica, ma vista da un soggetto che si trovasse sulla superficie della stella l'implosione non restava affatto congelata. La superficie della stella si contraeva senza esitazione al di là della circonferenza critica verso l'interno.

Wheeler, in effetti, si aspettava già questo risultato. Altri elementi (che saranno illustrati qui di seguito) lo avevano trasformato da critico dei buchi neri di Oppenheimer in un loro entusiastico sostenitore. Ma qui, per la prima volta, c'era la prova concreta fornita da simulazioni realistiche al computer: l'implosione deve produrre dei buchi neri.

Oppenheimer fu soddisfatto della conversione di Wheeler? Egli mostrò poco interesse e poca soddisfazione. Alla Conferenza internazionale di Dallas del dicembre 1963, in occasione della scoperta dei quasar (capitolo IX), Wheeler tenne un lungo intervento sull'implosione stellare nel quale descrisse con entusiasmo i calcoli di Oppenheimer e Snyder del 1939. Oppenheimer partecipò alla conferenza, ma durante l'intervento di Wheeler se ne stette seduto in corridoio a chiacchierare con degli amici di altre questioni. Trent'anni dopo, Wheeler ricorda l'episodio con la tristezza nella voce e nello sguardo.

Alla fine degli anni Cinquanta, Zel'dovich cominciò ad annoiarsi dell'attività di progettazione degli armamenti nucleari. La maggior parte dei problemi realmente interessanti era già stata risolta. In cerca di nuove sfide cominciò a fare sporadiche incursioni nella teoria delle particelle e poi nell'astrofisica, mantenendo la direzione della sua équipe di progettazione della bomba nell'Installazione e di un'altra équipe che effettuava calcoli accessori presso l'Istituto di matematica applicata a Mosca.

Durante l'attività di progettazione, Zel'dovich tempestava di idee le sue équipe, e i loro membri effettuavano i calcoli per verificare se esse funzionavano. «Le scintille di Zel'dovich e la benzina della sua équipe» è la descrizione che ne diede Ginzburg. Quando passò all'astrofisica, Zel'dovich mantenne il suo stile.

L'implosione stellare era tra i problemi di astrofisica che catturarono la sua fantasia. Per lui, come per Wheeler, Colgate, May e White in America, era ovvio che gli strumenti elaborati per la realizzazione della bomba all'idrogeno fossero perfettamente adatti alla simulazione matematica dell'implosione delle stelle.

Per sviscerare i particolari di un'implosione stellare realistica, Zel'dovich si accaparrò alcuni giovani colleghi: Dmitri Nadezhin e Vladimir Imshennik dell'Istituto di matematica applicata e Mikhail Podurets dell'Installazione. In una serie di intense discussioni, illustrò loro la sua visione di come l'implosione poteva essere simulata al computer, includendovi tutti gli effetti fondamentali che erano stati importanti per la bomba all'idrogeno: pressione, reazioni nucleari, onde d'urto, calore, radiazioni, emissione di massa.

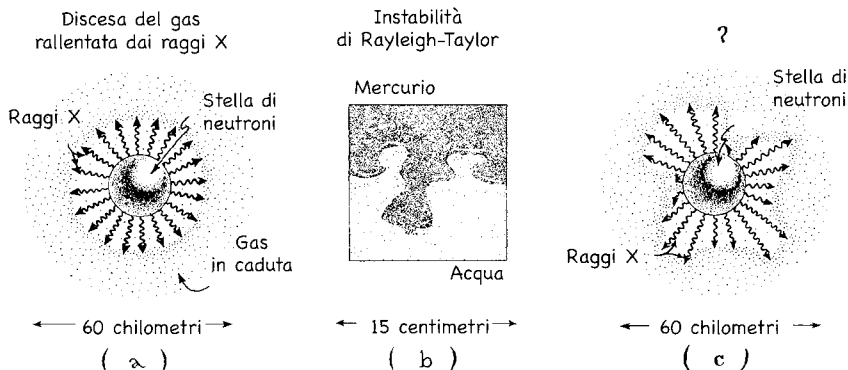
Stimolati da queste discussioni, Imshennik e Nadezhin simularono l'implosione di stelle dotate di una massa piccola, e verificarono, indipendentemente da Colgate e White in America, le ipotesi di Zwicky sulle supernovae. Parallelamente, Podurets simulò l'implosione di una stella massiva. I risultati di Podurets, pubblicati quasi simultaneamente a quelli di May e White in America, erano quasi identici a quelli degli americani. Non c'erano dubbi. L'implosione produce dei buchi neri, e lo fa esattamente nel modo descritto da Oppenheimer e Snyder.

L'adattamento dei codici per la progettazione della bomba alla simulazione dell'implosione stellare è solo una delle tante intime connessioni tra armi nucleari e astrofisica. Tali connessioni erano ovvie per Sakharov nel 1948. Appena gli ordinarono di unirsi all'équipe di progettazione della bomba diretta da Tamm, egli si mise a studiare l'astrofisica per prepararsi. Io stesso ho sbattuto inaspettatamente il naso su queste connessioni nel 1969.

Non avevo mai desiderato sapere in cosa consistesse l'idea di Teller-Ulam/Sakharov-Zel'dovich. La superbomba, che in virtù di quell'idea avrebbe potuto essere «arbitrariamente potente» mi appariva oscena, e non volevo neanche immaginare come funzionasse. Ma la mia ricerca alla scoperta del possibile ruolo delle stelle di neutroni nell'Universo introdusse a forza l'idea di Teller e Ulam nella mia coscienza.

Zel'dovich, diversi anni prima, aveva segnalato che il gas proveniente dallo spazio interstellare o da una stella vicina, cadendo su una stella di neutroni, avrebbe dovuto riscaldarsi e risplendere luminosamente: doveva diventare così caldo, in effetti, da emettere perlopiù raggi X anziché raggi luminosi meno carichi di energia. Il gas che cade sulla stella controlla il ritmo di emissione dei raggi X, affermava Zel'dovich, e viceversa, i raggi X emessi controllano il ritmo di caduta del gas. In tal modo entrambi, il gas e i raggi X, determinano insieme un *flusso autoregolato* costante. Se il gas precipita a un ritmo troppo elevato, produrrà molti raggi X, e l'emissione di raggi X colpirà il gas generando una pressione verso l'esterno che ne rallenterà la discesa (figura 6.4a). D'altra parte, se il gas scende a un ritmo troppo lento, produrrà così pochi raggi X che essi non saranno in grado di rallentare la discesa del gas, che continuerà a un ritmo più spedito. Vi è un unico ritmo di discesa del gas, né troppo alto né troppo basso, al quale i raggi X e il gas sono in equilibrio reciproco.

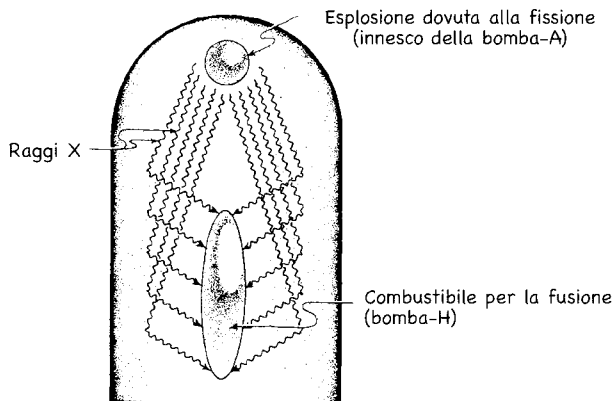
Questa raffigurazione del flusso di gas e di raggi X non mi convinceva. Sapevo fin troppo bene che, sulla Terra, se si cerca mantenere un fluido denso come il mercurio liquido su un liquido meno denso, come l'acqua, collocato al di sotto, delle lingue di mercurio si apriranno rapidamente una strada nell'acqua, il mercurio scivolerà rapidamente in basso e l'acqua risalirà rapidamente verso l'alto (figura 6.4b). Questo fenomeno prende il nome di *instabilità di Rayleigh-Taylor*. Nel quadro tracciato da Zel'dovich, i raggi X erano come l'acqua, a bassa densità, e il gas che scendeva come il mercurio ad alta densità. Le lingue di gas non si sarebbero aperte la strada attraverso i raggi X per precipitare liberamente attraverso quei canali distruggendo il flusso autoregolato di Zel'dovich (figura 6.4c)? Un calcolo dettagliato in base alle leggi della fisica avrebbe potuto dirmi se le cose stavano così, ma il calcolo sarebbe stato molto complesso e avrebbe richiesto molto tempo, così, invece di effettuarlo, sottoposi la questione a Zel'dovich in un pomeriggio del 1969, mentre stavamo discutendo di fisica nel suo appartamento a Mosca.

Zel'dovich sembrò un po' a disagio quando formulai la mia domanda, ma rispose con decisione: «No, Kip, questo non accade. Non ci sono lingue nei raggi X. Il flusso di gas è stabile». «Come fai a saperlo, Yakov Borisovich?», chiesi. Sorprendentemente, non ebbi risposta. Sembrava chiaro che Zel'dovich o qualcun altro avesse effettuato dei calcoli particolareggiati o degli esperimenti che dimostravano che i raggi X possono premere con forza sul gas senza che delle lingue del tipo Rayleigh-Taylor annullino questa spinta, ma Zel'dovich non poté indicarmi nessuna pubblicazione che riportasse tali

6.4 – (a) Il gas che precipita su una stella di neutroni è rallentato dalla pressione dei raggi X emessi verso l'esterno; (b) il mercurio liquido che cerca di cadere nel campo gravitazionale della Terra viene trattenuto dall'acqua al di sotto di esso, ne deriva un'instabilità di Rayleigh-Taylor; (c) è possibile che vi sia un'instabilità di Rayleigh-Taylor anche nel caso del gas in caduta trattenuto dai raggi X di una stella di neutroni?

calcoli o esperimenti, né mi illustrò precisamente come ciò accada dal punto di vista fisico. Che cosa inusuale per lui!

Qualche mese dopo stavo facendo un'escursione sull'Alta Sierra della California con Stirling Colgate (uno dei principali esperti americani di flussi dei fluidi e delle radiazioni, profondamente coinvolto nella fase finale della realizzazione della superbomba, e uno dei tre fisici di Livermore che avevano simulato al computer l'implosione di una stella). Mentre camminavamo, posi a Stirling la stessa domanda che avevo rivolto a Zel'dovich, e lui mi diede la stessa risposta. Il flusso è stabile; il gas non può sfuggire alla forza dei raggi X sviluppando delle lingue. «Come fai a saperlo, Stirling?», gli domandai. «È stato dimostrato», rispose. «Dove posso trovare questi calcoli o esperimenti?», chiesi. «Non saprei...».

«Molto strano», dissi a Sterling. «Zel'dovich mi ha detto esattamente la stessa cosa – il flusso è stabile. Ma, come te, non ha saputo indicarmi alcuna prova». «Affascinante. Allora Zel'dovich lo sapeva davvero», disse Stirling.

Allora lo seppi anch'io. Non avevo voluto saperlo. Ma la conclusione era inevitabile. L'idea di Teller e Ulam doveva consistere nell'uso dei raggi X

6.5 – Diagramma schematico che mostra un aspetto dell'idea di Teller-Ulam/Sakharov-Zel'dovich per la progettazione di una bomba all'idrogeno. Un'esplosione provocata dalla fissione (innesco della bomba atomica) produce un'intensa emissione di raggi X che in qualche modo vengono concentrati sul combustibile per la fusione (deuterato di litio, LiD). I raggi X presumibilmente riscaldano il combustibile per la fusione e contribuiscono a comprimerlo abbastanza a lungo da permettere alle reazioni di fusione di verificarsi. La tecnologia per concentrare i raggi X e altri problemi pratici sono talmente formidabili che conoscere questa parte del «segreto» di Teller e Ulam equivale ad aver percorso una distanza infinitesimale lungo la strada che porta alla costruzione di una superbomba che funzioni.

emessi nel primo microsecondo dell'innesco della fissione (bomba atomica) per riscaldare, aiutare a comprimere e incendiare il combustibile per la fusione della superbomba (figura 6.5). Che ciò sia parte dell'idea di Teller e Ulam è in effetti stato confermato negli anni Ottanta da diverse pubblicazioni americane desecretate, altrimenti non ne parlerei in questa sede.

Cosa portò Wheeler, un tempo scettico a riguardo, a credere nell'esistenza dei buchi neri e ad affermarla? Le simulazioni al computer dell'implosione delle stelle furono soltanto la convalida finale della sua conversione. Molto più importante fu il superamento di un blocco mentale. Questo blocco pervase la comunità dei fisici teorici dagli anni Venti fino agli anni Cinquanta. In parte era alimentato dalla stessa *singolarità di Schwarzschild* che all'epoca veniva usata al posto di un buco nero. Ma era alimentato anche dalla con-

clusione misteriosa e apparentemente paradossale derivante dai calcoli semplificati di Oppenheimer e Snyder, secondo cui una stella che implode resta congelata alla circonferenza critica («singolarità di Schwarzschild») dal punto di vista di un osservatore statico esterno, ma implode rapidamente oltre il punto di congelamento verso l'interno dal punto di vista di un osservatore ubicato sulla superficie della stella.

A Mosca, Landau e i suoi colleghi, pur credendo ai calcoli di Oppenheimer e Snyder, avevano gravi difficoltà a conciliare questi due punti di vista. «Non puoi capire quanto fosse difficile per la mente umana comprendere in che modo entrambi i punti di vista potessero essere simultaneamente veri», mi disse qualche anno più tardi Evgeny Lifshitz, il più caro amico di Landau.

Poi, un giorno del 1958, lo stesso anno in cui Wheeler attaccò le conclusioni di Oppenheimer e Snyder, arrivò a Mosca un numero della «Physical Review» con un articolo di David Finkelstein, assistente in un'università americana poco conosciuta, lo Stevens Institute of Technology di Hoboken, nel New Jersey. Landau e Lifshitz lessero l'articolo. Fu una rivelazione. Di colpo tutto divenne chiaro[5].

Finkelstein quell'anno visitò l'Inghilterra e tenne delle conferenze al Kings College a Londra. Roger Penrose (che in seguito avrebbe rivoluzionato la nostra concezione di cosa accade *all'interno* dei buchi neri; si veda il capitolo XIII) prese il treno per recarsi a Londra ad assistere alla conferenza di Finkelstein e tornò a Cambridge entusiasta.

A Princeton, Wheeler rimase in un primo momento affascinato, ma non era del tutto convinto. Si sarebbe convinto solo gradualmente nel corso degli anni seguenti. Era più lento di Landau e Penrose, credo, perché esaminava le cose più in profondità. Era fissato con la sua concezione secondo cui la gravità quantistica, in una stella che implode, deve far dissolvere i nucleoni (neutroni e protoni) attraverso un'emissione di radiazioni che sfuggono all'implosione, e sembrava impossibile conciliare questa concezione con l'intuizione di Finkelstein. Ciononostante, come vedremo in seguito, in un certo senso, nel profondo, sia l'una che l'altra erano corrette.

Qual era dunque l'intuizione di Finkelstein? Egli scoprì un po' per caso, e in appena un paio di passaggi matematici, un nuovo quadro di riferimento nel quale descrivere la geometria dello spaziotempo di Schwarzschild. Finkelstein non si interessava all'implosione delle stelle e non stabilì una connessione tra essa e il suo nuovo quadro di riferimento. Tuttavia, ad altri le

David Finkelstein, ca 1958. [Fotografia di Herbert S. Sonnenfeld; per gentile concessione di David Finkelstein].

implicazioni del suo nuovo quadro di riferimento apparivano chiare. Esso offriva loro una prospettiva totalmente nuova sull'implosione stellare.

La geometria dello spaziotempo all'esterno di una stella in fase di implosione è quella di Schwarzschild, e pertanto l'implosione della stella poteva essere descritta utilizzando il nuovo quadro di riferimento di Finkelstein. Esso era alquanto diverso dai quadri di riferimento che abbiamo incontrato in precedenza (capitoli I e II). La maggior parte di tali quadri (laboratori immaginari) erano piccoli, e tutte le porzioni di ogni quadro (sommità, fondo, lati e centro) erano in stato di quiete l'uno rispetto all'altro. Il quadro di riferimento di Finkelstein, invece, era abbastanza esteso da comprendere simultaneamente le regioni dello spaziotempo lontane dalla stella in fase di implosione, quelle vicine a essa, e tutte quelle intermedie. Cosa ancor più importante, le varie parti del quadro di Finkelstein erano in movimento le une rispetto alle altre: le parti lontane dalla stella erano statiche, ossia non implodevano, mentre le parti vicine alla stella cadevano verso l'interno assieme alla

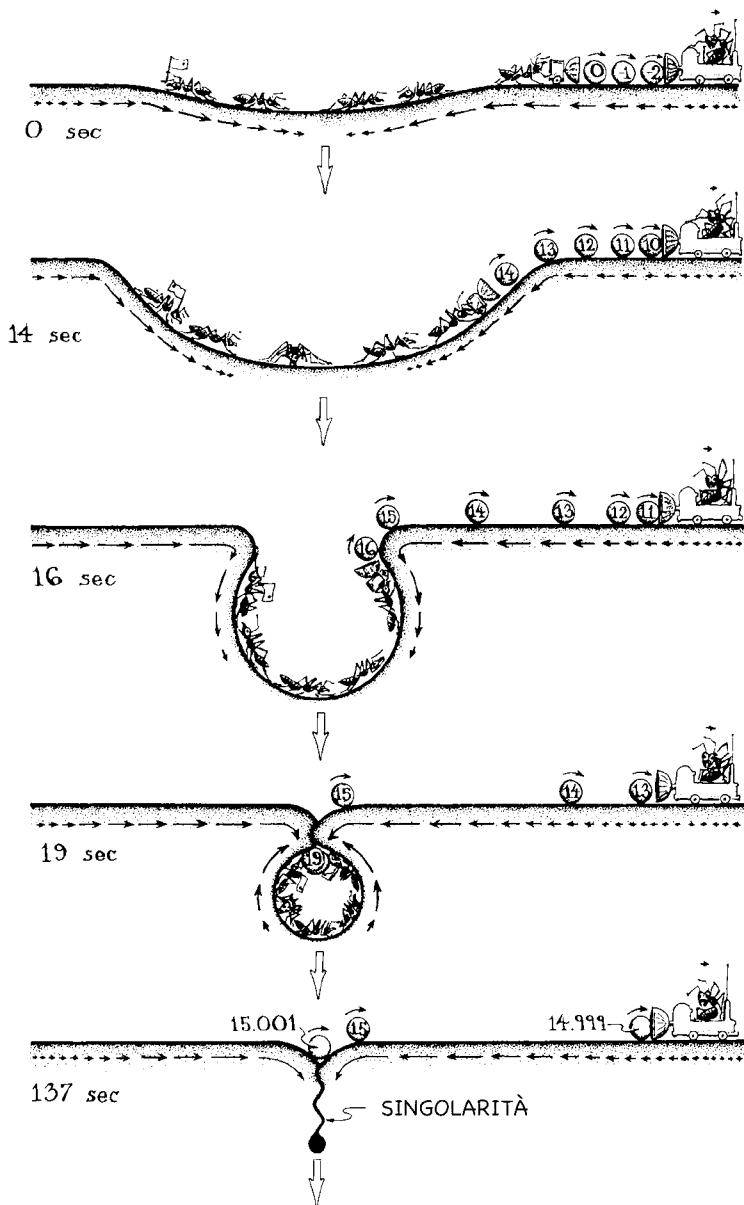
superficie della stella che stava implodendo. Di conseguenza, il quadro di Finkelstein poteva essere utilizzato per descrivere l'implosione della stella simultaneamente dal punto di vista di osservatori statici lontani e dal punto di vista di osservatori che precipitano verso l'interno insieme alla stella in implosione. La descrizione risultante riconciliava elegantemente il congelamento dell'implosione osservato da lontano con la prosecuzione dell'implosione osservata dalla superficie della stella.

Nel 1962, due membri del gruppo di ricerca di Wheeler a Princeton, David Beckedorff e Charles Misner, costruirono una serie di diagrammi a incasso per illustrare questa riconciliazione, e nel 1967 io convertii i loro diagrammi a incasso nella seguente analogia immaginaria per un articolo pubblicato sullo «Scientific American».

C'erano una volta sei formiche che vivevano su una grande membrana di gomma (figura 6.6). Poiché erano molto intelligenti, esse avevano imparato a comunicare usando delle palle segnaletiche che rotolavano a velocità costante (la «velocità della luce») sulla superficie della membrana. Purtroppo, le formiche non avevano calcolato la resistenza della membrana.

Un giorno cinque di loro si riunirono al centro della membrana e il loro peso la fece iniziare a collassare. Erano intrappolate; non potevano trascinarsi fuori abbastanza in fretta da fuggire. La sesta formica – una formica astronomo – si trovava a distanza di sicurezza con il suo telescopio da palle segnaletiche. Mentre la membrana collassava, le formiche intrappolate inviarono delle palle segnaletiche alla formica astronomo di modo che potesse seguire il loro destino.

La membrana, collassando, faceva due cose: primo, la sua superficie si contraeva verso l'interno trascinando gli oggetti circostanti verso il centro del crollo, analogamente al modo in cui la gravità di una stella che implode attira gli oggetti verso il suo centro. Secondo, la membrana si deformava e incurvava assumendo una forma simile a una scodella, analoga a quella dello spazio attorno a una stella in fase di implosione (si confronti la figura 6.2).

Man mano che il collasso procedeva, la superficie della membrana si contraeva sempre più rapidamente. Di conseguenza, le palle segnaletiche, inviate a intervalli regolari dalle formiche intrappolate, venivano ricevute dalla formica astronomo a intervalli di tempo sempre più ampi (ciò è analogo all'arrossamento della luce proveniente da una stella che sta implodendo). La palla n. 15 venne inviata 15 secondi dopo l'inizio del collasso, nel preciso istante in cui le formiche intrappolate venivano risucchiate attraverso la circonferenza critica della membrana. La palla 15 è rimasta per sempre blocca-

6.6 – Una membrana di gomma abitata da formiche che collassa può presentare un'analogia immaginaria con l'implosione gravitazionale di una stella che si trasforma in un buco nero [adattata da Thorne (1967)].

ta sulla circonferenza critica perché lì la membrana si stava contraendo esattamente alla velocità del movimento della palla (la velocità della luce). Appena 0,001 secondi prima di raggiungere la circonferenza critica, le formiche intrappolate spedirono la palla n. 14,999 (mostrata solo nell'ultimo diagramma). Questa palla, appena più veloce della membrana che si stava contraendo, raggiunse la formica astronomo solo 137 secondi dopo l'inizio del collasso. La palla n. 15,001, inviata 0,001 secondi dopo il raggiungimento della circonferenza critica, venne inesorabilmente risucchiata nella regione fortemente curva e venne schiacciata insieme alle cinque formiche intrappolate.

Ma la formica astronomo non lo venne mai a sapere. Non avrebbe mai ricevuto la palla segnaletica n.15 né qualsiasi altra inviata dopo di essa; e quelle inviate appena prima della 15 avrebbero impiegato così tanto tempo a fuoriuscire che a lei il collasso sarebbe sembrato rallentare e congelarsi esattamente al momento del raggiungimento della circonferenza critica. Questa analogia riproduce in modo notevolmente fedele il comportamento di una stella che implode.

1. La forma della membrana è esattamente quella dello spazio curvo intorno alla stella – come raffigurato nel diagramma a incasso.
2. I movimenti delle palle segnaletiche sulla membrana sono esattamente gli stessi di quelli dei fotoni di luce nello spazio curvo della stella che implode. In particolare, le palle segnaletiche si muovono alla velocità della luce in base alle misurazioni locali di qualsiasi formica si trovi in stato di quiete sulla membrana; ma le palle inviate appena prima della n. 15 impiegano un tempo molto lungo a fuoriuscire, talmente lungo che alla formica astronomo il collasso sembra congelarsi. Analogamente, i fotoni emessi dalla superficie della stella si muovono alla velocità della luce se misurati localmente da un soggetto qualsiasi; ma quelli emessi appena prima che la stella si comprima entro la sua circonferenza critica (il suo orizzonte) impiegano un tempo molto lungo a fuoriuscire, tanto lungo che agli osservatori esterni deve apparire congelato.
3. Le formiche intrappolate non osservano nessun congelamento al raggiungimento della circonferenza critica. Esse vengono risucchiate oltre la circonferenza critica senza esitazione e schiacciate. Analogamente, chiunque si trovi sulla superficie di una stella che sta implodendo non vede l'implosione congelarsi. Subirà l'implosione senza nessun arresto e verrà schiacciato dalla marea gravitazionale (capitolo XIII).

Questo, espresso nei diagrammi a incasso, era il contributo che veniva dal nuovo quadro di riferimento di Finkelstein. Con questa visione dell'implosione non c'erano più misteri. Una stella che implode si contrae realmente oltre la circonferenza critica senza esitazione. Che sembri congelarsi, se vista da lontano, è un'illusione.

I diagrammi a incasso della parabola delle formiche colgono solo alcuni aspetti della maggiore comprensione che derivava dal nuovo quadro di riferimento di Finkelstein, non tutti. Altri elementi sono inseriti nella figura 6.7, che è un diagramma spaziotemporale della stella in fase di implosione.

Finora gli unici diagrammi spaziotemporali che abbiamo incontrato si inserivano nello spaziotempo piatto della relatività speciale, ad esempio nella figura 1.3. In essa abbiamo tracciato i nostri diagrammi da due punti di vista diversi: quello di un quadro di riferimento inerziale in stato di quiete nella città di Pasadena (dove l'attrazione gravitazionale verso il basso veniva ignorata), nella figura 1.3c; e quello di un quadro inerziale legato alla vostra automobile sportiva mentre sfrecciate per il Colorado Boulevard di Pasadena, nella figura 1.3b. In ogni diagramma abbiamo tracciato lo spazio del quadro prescelto orizzontalmente, e il suo tempo verticalmente.

Nella figura 6.7 il quadro di riferimento prescelto è quello di Finkelstein. Di conseguenza, tracciamo orizzontalmente due delle tre dimensioni dello spazio, misurate nel quadro di Finkelstein (lo «spazio di Finkelstein») e verticalmente il tempo, misurato all'interno del suo quadro (il «tempo di Finkelstein»). Poiché lontano dalla stella il quadro di Finkelstein è statico (non implode), lì il tempo di Finkelstein è quello di cui fa esperienza un osservatore statico. E poiché in prossimità della stella il quadro di Finkelstein precipita verso l'interno assieme alla superficie della stella che implode, lì il tempo di Finkelstein è quello di cui fa esperienza un osservatore che sta precipitando.

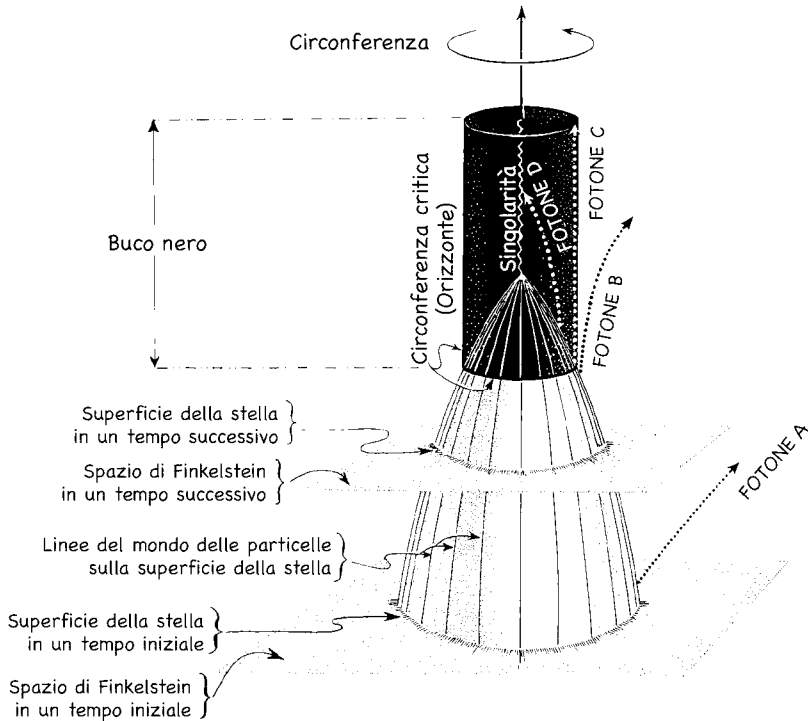
Il diagramma mostra due strati orizzontali. Ognuno raffigura due delle dimensioni dello spazio in un istante di tempo specifico, ma senza la curvatura dello spazio, che in tal modo appare piatto. Più specificamente, in questi strati orizzontali le circonferenze intorno al centro della stella sono rappresentate fedelmente, ma i raggi (le distanze dal centro) no. Per rappresentare fedelmente sia le une che gli altri dovremmo usare dei diagrammi a incasso come quelli della figura 6.2 o come quelli della parabola delle formiche, nella figura 6.6. La curvatura dello spazio apparirebbe allora evidente: le circonferenze sarebbero pari a meno di 2π volte il raggio. Disegnando gli strati

orizzontali piatti, ne stiamo artificialmente ignorando la curvatura. Questo appiattimento scorretto dello spazio è il prezzo che paghiamo per rendere leggibile il diagramma. Il vantaggio sta nella possibilità di vedere lo spazio e il tempo insieme in un unico diagramma leggibile.

Nel tempo iniziale indicato nel diagramma (strato orizzontale in fondo), la stella, di cui si trascura una dimensione spaziale, è l'interno di un ampio cerchio; se la dimensione mancante venisse reinserita, la stella sarebbe l'interno di una grande sfera. In un tempo successivo (secondo strato), la stella si è rimpicciolita; essa ora è l'interno di un cerchio più piccolo. In un tempo ancora successivo, la stella oltrepassa la propria circonferenza critica e ancora dopo si contrae fino ad avere una circonferenza pari a zero, creando in quel punto una *singolarità* in cui, secondo la relatività generale, la stella viene stritolata e sparisce dall'esistenza. Affronteremo i dettagli di questa singolarità solo nel capitolo XIII, ma è fondamentale sapere che si tratta di una cosa completamente diversa dalla «singolarità di Schwarzschild» di cui i fisici parlavano dagli anni Venti fino agli anni Cinquanta. La «singolarità di Schwarzschild» era il nome erroneo che essi davano alla circonferenza critica o a un buco nero; questa «singolarità» è l'oggetto che risiede al centro di un buco nero.

Il buco nero stesso è la regione dello spaziotempo segnata in nero nel diagramma, ossia, la regione all'interno della circonferenza critica che rappresenta il futuro della stella in fase di implosione. La superficie del buco (il suo orizzonte) si trova in corrispondenza della circonferenza critica.

Il diagramma mostra anche le linee del mondo (traiettorie attraverso lo spaziotempo) di alcune particelle unite alla superficie della stella. Scorrendo il diagramma verso l'alto (ossia, al passare del tempo), si vedono queste linee del mondo avvicinarsi sempre più al centro della stella (all'asse centrale del diagramma). Questo movimento mostra il rimpicciolimento della stella nel tempo.

Di grande interesse sono le linee del mondo di quattro fotoni (quattro particelle luminose). Questi fotoni sono analoghi alle palle segnaletiche della parabola delle formiche. Il fotone A viene emesso verso l'esterno dalla superficie della stella nel momento in cui quest'ultima inizia a implodere (lo strato in basso). Esso procede in direzione dell'esterno senza difficoltà, verso circonferenze sempre più ampie man mano che il tempo passa (man mano che si scorre verso l'alto nel diagramma). Il fotone B, emesso poco prima che la stella raggiunga la circonferenza critica, ha bisogno di un tempo più lungo per fuoriuscire, esso è analogo alla palla segnaletica n. 14,999 della pa-

6.7 – Un diagramma spaziotemporale che raffigura l'implosione di una stella che darà luogo a un buco nero. Il tempo, misurato nel quadro di riferimento di Finkelstein, è tracciato verticalmente. Orizzontalmente sono tracciate due delle tre dimensioni spaziali di tale quadro. Gli strati orizzontali sono delle «istantanee» della stella in fase di implosione e del buco nero che essa crea in momenti specifici del tempo di Finkelstein, ma la curvatura dello spazio è stata omessa.

rabola delle formiche. Il fotone C, emesso esattamente al raggiungimento della circonferenza critica, resta sempre lì come la palla segnaletica n. 15. E il fotone D, emesso dall'interno della circonferenza critica (all'interno del buco nero) non fuoriesce mai, viene attratto nella singolarità dall'immensa gravità del buco, proprio come la palla segnaletica 15,001.

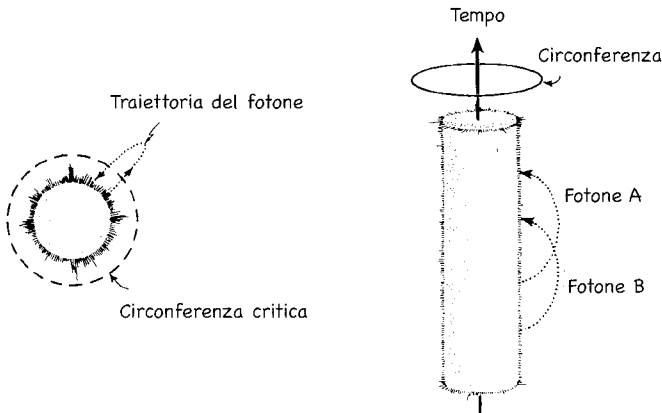
È interessante confrontare questa visione moderna della propagazione della luce emessa da una stella che implode con le previsioni formulate nel

XVIII secolo relativamente alla luce emessa da una stella più piccola della sua circonferenza critica.

Si ricordi (capitolo III) che alla fine del XVIII secolo John Mitchell in Inghilterra e Pierre Simon Laplace in Francia avevano utilizzato la legge di gravità e la descrizione corpuscolare della luce di Newton per predire l'esistenza dei buchi neri. Questi «buchi neri newtoniani» erano effettivamente stelle statiche dalla circonferenza così piccola (inferiore alla circonferenza critica) che la gravità impediva alla luce di allontanarsi dalle vicinanze della stella.

La parte sinistra della figura 6.8 (un diagramma spaziale, non spaziotemporale) raffigura una simile stella al di sotto della sua circonferenza critica, e la traiettoria spaziale di un fotone (corpuscolo luminoso) emesso dalla superficie della stella quasi verticalmente (radialmente). Il fotone lanciato verso l'esterno, come una pietra scagliata, viene rallentato dall'attrazione gravitazionale della stella, si arresta e poi ricade sulla superficie della stella.

La parte destra della figura illustra in un diagramma spaziotemporale i movimenti di due di questi fotoni. Verticalmente è raffigurato il tempo universale newtoniano, orizzontalmente il suo spazio assoluto. Con il passare del tempo, la stella circolare forma un cilindro verticale; in ogni momento

6.8 – Le previsioni, in base alle leggi newtoniane della fisica, sul movimento dei corpuscoli luminosi (fotoni) emessi da una stella che si trova al di sotto della sua circonferenza critica. *A sinistra*: un diagramma spaziale (simile alla figura 3.1). *A destra*: un diagramma spaziotemporale.

dato (lo strato orizzontale che taglia il diagramma) la stella è descritta dallo stesso cerchio, come nella parte sinistra della figura. Con il passare del tempo, il fotone A vola fuori e poi ricade sulla stella, e il fotone B, emesso poco dopo, fa altrettanto.

È istruttivo confrontare questa versione newtoniana (non corretta) di una stella al di sotto della sua circonferenza critica e dei fotoni che emette con la versione relativistica (corretta) della figura 6.7. Il confronto evidenzia due profonde differenze tra le previsioni di Newton e quelle di Einstein.

1. Le leggi di Newton (figura 6.8) permettono a una stella di circonferenza inferiore a quella critica di vivere felicemente senza implodere, con la sua attrazione gravitazionale eternamente controbilanciata dalla sua pressione interna. Le leggi di Einstein (figura 6.7) affermano che quando una stella è più piccola della sua circonferenza critica, la sua attrazione gravitazionale diventa così forte che nessuna pressione interna potrà mai controbilanciarla. La stella non ha altra scelta che implodere.
2. Le leggi di Newton (figura 6.8) prevedono che i fotoni emessi dalla superficie della stella all'inizio volino via verso circonferenze più ampie, in certi casi perfino più ampie di quella critica, e poi vengano trascinati indietro. Le leggi di Einstein (figura 6.7) stabiliscono che qualsiasi fotone emesso dall'interno della circonferenza critica si muova verso circonferenze sempre più piccole. L'unico caso in cui un simile fotone potrebbe lasciare la superficie della stella è quello in cui quest'ultima si contrae a una velocità superiore a quella del fotone diretto verso l'interno (figura 6.7).

Sebbene l'intuizione di Finkelstein e le simulazioni del codice della bomba convincessero pienamente Wheeler del fatto che l'implosione di una stella massiva debba produrre un buco nero, il destino della materia stellare che implode continuava a lasciarlo inquieto negli anni Sessanta, così come lo aveva reso inquieto il confronto con Oppenheimer a Bruxelles nel 1958. La relatività generale affermava che la materia stellare sarebbe stata cancellata dall'esistenza nella singolarità al centro del buco nero (capitolo XIII), ma una simile previsione appariva fisicamente inaccettabile. A Wheeler sembrava chiaro che le leggi della relatività generale dovessero cessare di essere valide al centro del buco e dovessero essere sostituite dalle nuove leggi della *gravità quantistica*, e queste nuove leggi dovevano arrestare la contrazione. Forse, ipotizzava Wheeler, basandosi sulle concezioni che aveva esposto a Bruxelles, le nuove leggi avrebbero trasformato la materia che implodeva in

radiazioni che per vie meccanico-quantistiche si sarebbero scavate un «tunnel» per fuoriuscire dal buco e fuggire nello spazio interstellare. Verificare questa ipotesi richiedeva una profonda comprensione della connessione tra meccanica quantistica e relatività generale. In ciò risiedeva la bellezza della speculazione. Era un banco di prova per contribuire alla scoperta delle nuove leggi della gravità quantistica.

Quando ero uno studente di Wheeler, nei primi anni Sessanta, pensavo che la sua ipotesi della materia che viene convertita in radiazioni nella singolarità e poi si apre una strada per uscire dal buco nero fosse alquanto bizzarra. Come poteva, Wheeler, credere a una cosa del genere? Le nuove leggi della gravità quantistica avrebbero certamente avuto la loro importanza nella singolarità al centro del buco, come affermava Wheeler. Ma non in prossimità della circonferenza critica. La circonferenza critica apparteneva al «regno del macroscopico», dove la relatività generale deve essere molto precisa; e le leggi relativistiche generali erano inequivocabili: nulla può fuoriuscire dalla circonferenza critica. La gravità trattiene qualsiasi cosa al suo interno. Perciò non poteva esistere nessun «tunnel di tipo meccanico-quantistico» (qualsiasi cosa esso fosse) che permettesse alle radiazioni di uscire; ne ero fermamente convinto.

Nel 1964 e nel 1965 io e Wheeler scrivemmo un libro tecnico insieme a Kent Harrison e a Masami Wakano sulle stelle fredde e morte e sull'implosione stellare. Rimasi scioccato quando Wheeler insisté per inserire nell'ultimo capitolo la sua ipotesi sulle radiazioni che avrebbero potuto aprirsi una strada per uscire dal buco e diffondersi nello spazio interstellare. In un tentativo dell'ultimo minuto per convincere Wheeler a eliminare l'ipotesi dal libro, chiamai in soccorso David Sharp, uno dei suoi postdoc. Io e David discutemmo energicamente con Wheeler in una telefonata a tre, e Wheeler alla fine capitolò.

Wheeler aveva ragione, io e David torto. Dieci anni dopo, Zel'dovich e Stephen Hawking avrebbero utilizzato una nuova versione dell'unione tra relatività generale e meccanica quantistica per dimostrare, matematicamente, che le radiazioni *possono* aprirsi una strada per uscire da un buco nero, anche se molto, molto lentamente (capitolo XII). In altre parole, i buchi neri possono evaporare, anche se lo fanno così lentamente che un buco nero formatosi in seguito all'implosione di una stella richiederà un tempo molto più lungo dell'età del nostro Universo per scomparire.

I nomi che diamo alle cose sono importanti. Gli agenti delle star del cinema che cambiano i nomi dei loro clienti da Norma Jean Baker in Marilyn

Monroe e da Béla Blasko in Béla Lugosi, lo sanno bene. E anche i fisici. Nell'industria del cinema un nome contribuisce a definire un'atmosfera, il quadro mentale con cui lo spettatore guarda alla stella – glamour per Marylin Monroe, horror per Béla Lugosi. Nella fisica un nome aiuta a definire il quadro mentale a partire dal quale consideriamo un concetto fisico. Un buon nome evoca un'immagine mentale che esalta le proprietà più importanti del concetto, e quindi contribuisce ad attivare, in qualche modo inconscio, intuitivo, una ricerca valida. Un nome sbagliato può creare blocchi mentali e ostacolare la ricerca.

Forse nulla contribuì a impedire ai fisici tra il 1939 e il 1958 di comprendere l'implosione di una stella più del nome che usavano per la circonferenza critica: «singolarità di Schwarzschild». La parola «singolarità» evocava l'immagine di una regione in cui la gravità diventa infinitamente forte, infrangendo le leggi della fisica così come noi le conosciamo, un'immagine che oggi sappiamo essere corretta per l'oggetto al centro di un buco nero, ma non per la circonferenza critica. Questa immagine rendeva difficile ai fisici accettare la conclusione di Oppenheimer e Snyder secondo cui un individuo che viaggi oltre la singolarità di Schwarzschild (la circonferenza critica) in una stella che sta implodendo *non* sperimenterà una gravità infinita e *non* osserverà alcuna infrazione delle leggi della fisica.

Quanto *non singolare* sia in realtà la singolarità di Schwarzschild (circonferenza critica) divenne davvero chiaro solo dopo che David Finkelstein ebbe scoperto il suo nuovo quadro di riferimento e lo ebbe utilizzato per mostrare che la singolarità di Schwarzschild altro non è che un luogo nel quale le cose possono cadere dentro, ma dal quale niente può uscire, e pertanto un luogo dentro il quale, dall'esterno, non potremo mai guardare. Una stella che implode continua a esistere dopo essere sprofondata oltre la singolarità di Schwarzschild, come mostrava il quadro di riferimento di Finkelstein, proprio come il Sole continua a esistere dopo essere scomparso oltre l'orizzonte della Terra. Ma proprio come noi che ci troviamo sulla Terra non possiamo vedere il Sole al di là del nostro orizzonte, degli osservatori che si trovino lontani da una stella in fase di implosione non possono vedere la stella implodere oltre la singolarità di Schwarzschild. Questa analogia spinse Wolfgang Rindler, un fisico della Cornell University negli anni Cinquanta, a dare alla singolarità di Schwarzschild (la circonferenza critica) un nuovo nome, che da allora ha fatto presa: la chiamò *orizzonte*.

Restava il problema di come chiamare l'oggetto formato dall'implosione stellare. Tra il 1958 e il 1968 vennero usati diversi nomi in Occidente e in

Oriente: i fisici sovietici usavano un nome che metteva l'accento sulla visione dell'implosione da parte di un astronomo lontano. Si ricordi che a causa dell'enorme difficoltà che ha la luce a sfuggire alla presa della gravità, vista da lontano l'implosione sembra durare per sempre; sembra che la superficie della stella non raggiunga mai la circonferenza critica e che l'orizzonte non si formi mai. Agli astronomi sembra (o sembrerebbe, se disponessero di telescopi tanto potenti da vedere la stella in fase di implosione) che la stella si congeli appena fuori della circonferenza critica. Per questa ragione, i fisici sovietici chiamavano l'oggetto prodotto dall'implosione una *stella congelata*, e questo nome contribuì a definire l'impostazione e il quadro mentale della loro ricerca sull'implosione negli anni Sessanta.

In Occidente, invece, si metteva l'accento sulla visione di un individuo che si trovi sulla superficie della stella che implode e si muova verso l'interno, oltre l'orizzonte fin dentro la singolarità vera e propria e, di conseguenza, l'oggetto che si veniva a formare in tal modo veniva chiamato *stella collassata*. Questo nome ha contribuito a focalizzare l'attenzione dei fisici su un aspetto che divenne poi il principale interesse di John Wheeler: la natura della singolarità in cui la fisica quantistica e la curvatura dello spaziotempo si sarebbero unite.

Nessun nome era soddisfacente. Nessuno prestava particolare attenzione all'orizzonte che circonda la stella collassata e che è responsabile dell'illusione ottica del «congelamento» stellare. Durante gli anni Sessanta, i calcoli dei fisici rivelarono gradualmente l'enorme importanza dell'orizzonte e gradualmente John Wheeler – la persona che più di ogni altra si preoccupa di usare dei nomi ottimali – cominciò a sentirsi sempre più insoddisfatto.

È abitudine di Wheeler riflettere sui nomi che diamo alle cose mentre si rilassa nella vasca da bagno o è a letto di notte. A volte cerca per mesi in questo modo il nome giusto da dare a qualcosa. E così fece, alla ricerca di qualcosa con cui sostituire «stella congelata» o «stella collassata». Infine, nel 1967, egli trovò il nome perfetto.

Nel suo tipico stile, Wheeler non andò dai suoi colleghi a dire: «Ho trovato un nuovo nome meraviglioso per queste cose, chiamiamole parapà». Invece, cominciò semplicemente a usare quel nome come se non ne fosse mai esistito un altro, come se tutti avessero già concordato sul fatto che quello era il nome giusto. Lo sperimentò in una conferenza sulle pulsar a New York verso la fine dell'autunno del 1967 e lo adottò con decisione in una conferenza tenuta nel dicembre del 1967 presso l'American Association for the Advancement of Science intitolata *Il nostro Universo, il noto e l'ignoto*. Quelli di noi

che non erano presenti lo incontrarono per la prima volta nella versione scritta del suo intervento: «A causa della sua caduta sempre più veloce [la superficie della stella che sta implodendo] si allontana dall'osservatore [distante] sempre più rapidamente. La luce si sposta verso il rosso. Diventa più flebile di millisecondo in millisecondo, e in meno di un secondo è troppo oscura per essere vista... [La stella] come il gatto del Cheshire, sparisce alla vista. Uno si lascia dietro solo il sorriso, l'altra l'attrazione gravitazionale. Attrazione gravitazionale, sì; luce, no. Nessun'altra particella fuoriesce, più di quanto non faccia la luce. Inoltre, la luce e le particelle provenienti dall'esterno... [e] che scendono giù per il buco nero, non fanno che aggiungersi alla massa e aumentarne l'attrazione gravitazionale».

Buco nero era il nuovo nome di Wheeler. In pochi mesi esso venne adottato entusiasticamente dai fisici della relatività, dagli astrofisici e dal vasto pubblico, a Est come a Ovest, con un'eccezione: in Francia, dove l'espressione *trou noir* (buco nero) ha un significato osceno, vi furono resistenze per diversi anni.

VII. L'ETÀ DELL'ORO

Dove si scopre che i buchi neri ruotano e pulsano,
immagazzinano e rilasciano energia,
e non hanno peli

L'anno era il 1975; il luogo, l'Università di Chicago, nella parte a sud della città presso le rive del lago Michigan. Lì, in un ufficio ad angolo che dava sulla Cinquantaseiesima Strada, Subrahmanyan Chandrasekhar era immerso nell'elaborazione di una descrizione matematica completa dei buchi neri. I buchi neri che stava analizzando erano creature radicalmente diverse da quelle dei primi anni Sessanta, quando i fisici avevano cominciato ad accettare il concetto di buco nero. Il decennio trascorso era stato un'*età dell'oro* per la ricerca in questo campo, un'era che ha rivoluzionato la nostra conoscenza delle previsioni della relatività generale.

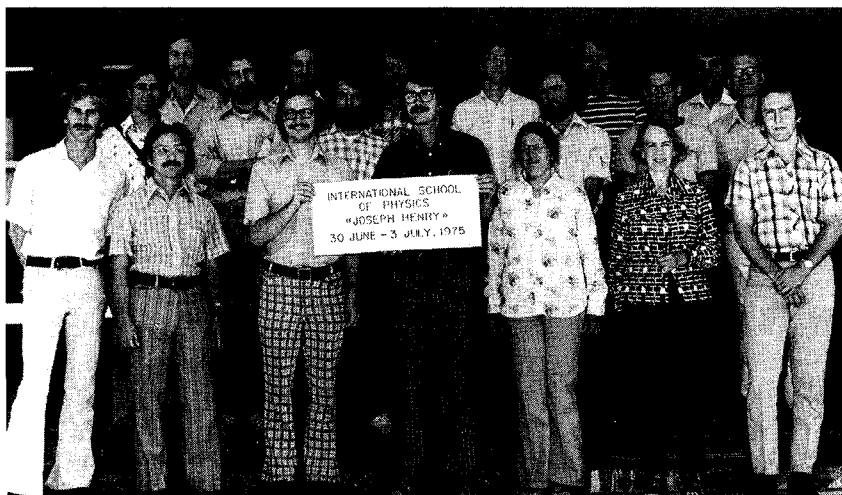
Nel 1964, all'inizio dell'età dell'oro, si riteneva che i buchi neri fossero esattamente ciò che il loro nome suggeriva: buchi nello spazio dentro i quali le cose possono cadere, e dai quali niente può uscire. Ma durante l'età dell'oro i calcoli effettuati uno dopo l'altro, da più di un centinaio di fisici utilizzando le equazioni della relatività generale di Einstein, avevano trasformato il quadro. Ora, mentre Chandrasekhar sedeva nel suo ufficio a Chicago a fare calcoli, i buchi neri non erano più considerati come semplici buchi nello spazio in stato di quiescenza, ma come oggetti dinamici. Un buco nero doveva essere in grado di ruotare, e quando ruota crea un movimento vorticoso simile a un ciclone nello spaziotempo curvo attorno a sé. In quel vortice dovrebbero essere immagazzinate energie enormi, energie cui la natura può attingere per alimentare esplosioni cosmiche. Quando delle stelle, dei pianeti o dei buchi più piccoli cadono dentro un buco di grandi dimensioni, dovrebbero farlo pulsare. Il suo orizzonte dovrebbe pulsare dentro e fuori, come la superficie della Terra pulsa su e giù dopo un terremoto, e queste pulsazioni dovrebbero produrre onde gravitazionali, increspature nella curvatura dello spaziotempo che si propagano per l'Universo trasportando con sé una descrizione sinfonica del buco.

Forse la sorpresa più grande emersa dall'età dell'oro era l'affermazione in base alla relatività generale secondo cui sarebbe possibile prevedere con esattezza tutte le proprietà di un buco nero a partire da tre soli dati: la massa del buco, il suo tasso di rotazione e la sua carica elettrica. A partire da questi tre numeri, se si era abbastanza abili con la matematica, si era in grado di calcolare, ad esempio, la forma dell'orizzonte del buco, la forza della sua attrazione gravitazionale, i particolari del vortice spaziotemporale attorno a esso e la frequenza della sua pulsazione. Molte di queste proprietà erano note dal 1975, ma non tutte. Calcolare e quindi scoprire tutte le proprietà rimanenti dei buchi neri era una sfida difficile, esattamente il tipo di sfide che piaceva a Chandrasekhar. E nel 1975 egli la raccolse trasformandola nel suo personale cammino di ricerca.

Per quasi quarant'anni il dolore provocato dagli scontri con Eddington negli anni Cinquanta aveva covato dentro Chandrasekhar impedendogli di riprendere la ricerca sul destino di buchi neri che attendeva le stelle massive. In quei quarant'anni aveva gettato molte delle fondamenta della moderna astrofisica, fondamenta che riguardavano le teorie delle stelle e delle loro pulsazioni, le galassie, le nubi di gas interstellare e molto altro. Ma con tutto ciò, il destino delle stelle massive aveva continuato ad affascinarlo. Infine, nell'età dell'oro, aveva superato il suo dolore ed era tornato a occuparsene.

Egli rientrava in una comunità di ricercatori in cui quasi tutti erano studenti e postdoc. L'età dell'oro era dominata dai giovani, e Chandrasekhar, che era giovane nell'animo, ma di mezz'età e conservatore nei modi, venne accolto tra loro. Nel corso di prolungate visite al Caltech e a Cambridge, lo si poteva incontrare nella caffetteria circondato da brillanti laureati vestiti in modo informale, mentre lui indossava un poco innovativo vestito grigio scuro – il «grigio Chandrasekhar», come i suoi giovani amici chiamavano quel colore.

L'età dell'oro fu breve. Era stato Bill Press, uno studente uscito dal Caltech, a battezzare così quell'epoca, e nell'estate del 1975, proprio quando Chandrasekhar stava per lanciarsi nell'impresa di calcolare le proprietà dei buchi neri, Press organizzò il suo funerale: una conferenza all'Università di Princeton alla quale erano invitati solo ricercatori che avessero meno di trent'anni[1]. Alla conferenza Press e molti dei suoi giovani colleghi decisero che era giunta l'ora di dedicarsi ad altri temi di ricerca. Il profilo generale dei buchi neri in quanto oggetti dinamici, rotanti e pulsanti era stato delineato, e il rapido ritmo delle scoperte teoriche stava ormai cominciando a rallentare. Tutto quello che restava da fare, sembrava, era sistemare i particolari. Chandrasekhar e pochi altri avrebbero potuto farlo agevolmente, mentre i

In alto: S. Chandrasekhar nella caffetteria degli studenti («The Greasy») al Caltech con gli studenti Saul Teukolsky (a sinistra) e Alan Lightman (a destra) nell'autunno 1971. *In basso*: I partecipanti alla conferenza/funerale dell'età dell'oro della ricerca sui buchi neri, Princeton, estate 1975. Prima fila, da sinistra: Jacobus Petterson, Philip Yasskin, Bill Press, Larry Smarr, Beverly Berger, Georgia Witt, Bob Wald. Seconda e terza fila, da sinistra: Philip Marcus, Peter D'Eath, Paul Schechter, Saul Teukolsky, Jim Nester, Paul Wiita, Michael Schull, Bernard Carr, Clifford Will, Tom Chester, Bill Unruh, Steve Christensen. [In alto: per gentile concessione di Sándor J. Kovács; in basso: per gentile concessione di Seul Teukolsky].

suoi giovani (ormai non più tanto) amici avrebbero cercato nuove sfide altrove. Chandrasekhar non ne era molto contento.

I mentori: Wheeler, Zel'dovich, Sciama

Chi erano questi giovani che hanno rivoluzionato le nostre conoscenze sui buchi neri? La maggior parte di loro erano studenti, postdoc, e «nipoti» intellettuali di tre grandi insegnanti: John Archibald Wheeler a Princeton, Yakov Borisovich Zel'dovich a Mosca e Dennis Sciama a Cambridge. Attraverso la loro progenie intellettuale, Wheeler, Zel'dovich e Sciama hanno dato la loro impronta alla visione che oggi abbiamo dei buchi neri.

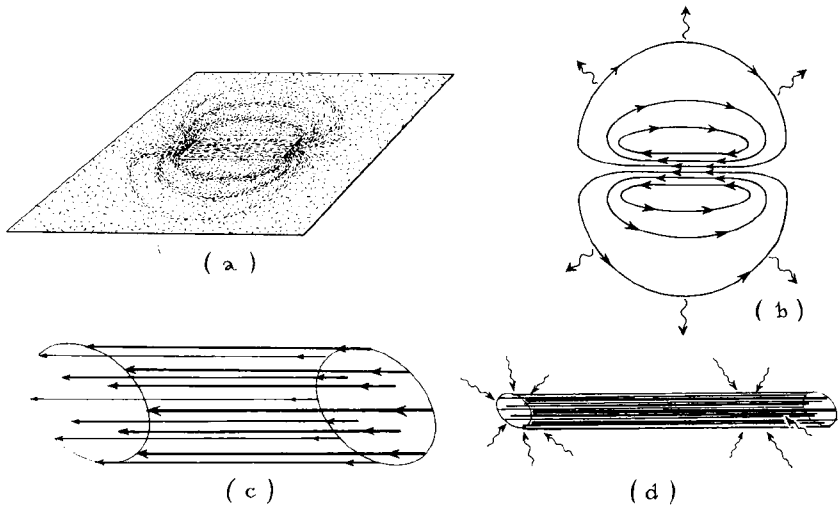
Ognuno di questi mentori aveva il suo stile. A dire il vero, è difficile trovare degli stili più diversi. Wheeler era un insegnante carismatico, ispiratore, lungimirante. Zel'dovich era il giocatore/allenatore che guidava con mano severa una squadra molto unita. Sciama era un catalizzatore dedito al sacrificio personale. Incontreremo ciascuno di loro nelle pagine seguenti.

Ricordo molto bene il mio primo incontro con Wheeler. Era il settembre del 1962, due anni prima dell'avvento dell'età dell'oro. Wheeler si era recentemente convertito al concetto dei buchi neri e io, a ventidue anni, mi ero appena laureato al Caltech ed ero arrivato a Princeton per proseguire gli studi e ottenere un Ph.D. Il mio sogno era dedicarmi alla ricerca sulla relatività sotto la guida di Wheeler, così, quella prima volta, bussai alla sua porta con trepidazione.

Il professor Wheeler mi accolse con un sorriso amichevole, mi fece strada nel suo ufficio e cominciò immediatamente (come se fossi un suo stimato collega e non un novizio assoluto) a discutere i misteri dell'implosione stellare. Il tono e il contenuto di quella emozionante discussione privata sono descritti in alcune pagine di Wheeler scritte all'epoca: «Vi sono state poche occasioni nella storia della fisica in cui si potevano formulare ipotesi con più sicurezza di quanto non si faccia adesso [nello studio dell'implosione stellare] che ci si trova di fronte a un fenomeno nuovo, di natura di per sé misteriosa, che attende di essere svelato... Qualunque sia il risultato [degli studi futuri], si ha l'impressione [per quanto riguarda l'implosione stellare] di trovarsi davanti a un fenomeno in cui la relatività generale si manifesta appieno e in cui si consumerà la sua focosa unione con la fisica quantistica». Ne uscii, un'ora dopo, convertito.

Wheeler era fonte di ispirazione per un gruppo tra i cinque e i dieci studenti e postdoc di Princeton – ispirazione, ma non guida particolareggiata. Egli presupponeva che fossimo abbastanza brillanti da elaborare da soli i dettagli. A ognuno di noi suggerì un primo argomento di ricerca, un aspetto che potesse portare qualche nuova conoscenza sull'implosione stellare, o sui buchi neri, o sulla «focosa unione» tra la relatività generale e la fisica quantistica. Se quel primo problema si rivelava troppo arduo, ci indirizzava gentilmente verso una strada più facile. Se si rivelava troppo facile, ci incitava a estrarne tutta la conoscenza possibile, quindi a scrivere un articolo tecnico in merito e a passare a un problema più impegnativo. Imparammo presto a occuparci di più problemi al tempo stesso, uno talmente complesso che per risolverlo occorreva tornarci sopra più volte nell'arco di molti mesi o anni, con la speranza di ottenere un grande risultato; e altri molto più semplici e dai risultati immediati. In tutto ciò, Wheeler dava solo i consigli indispensabili a evitare che brancolassimo nel buio, mai tanti da darci l'impressione che avesse risolto il problema al posto nostro.

Il mio primo problema era notevole: prendete una barra magnetica il cui campo magnetico fuoriesca dalle due estremità. Esso è formato da linee di campo, che si insegna ai bambini a rendere visibili spargendo della limatura di ferro su un foglio di carta posto sopra una calamita (figura 7.1a). Le linee di campo adiacenti si respingono reciprocamente (è possibile avvertire la loro repulsione avvicinando tra loro i poli nord di due magneti. Le linee del campo magnetico sono tenute assieme, malgrado la loro repulsione, dal ferro del magnete. Eliminate il ferro e la repulsione farà esplodere le linee di campo (figura 7.1b). Tutto ciò mi era familiare fin dalla scuola. Wheeler me lo riportò alla mente in una lunga discussione privata nel suo ufficio a Princeton. Poi mi descrisse una recente scoperta del suo amico Mael Melvin, professore presso la Florida State University a Tallahassee.

Melvin aveva dimostrato, usando l'equazione di campo di Einstein, non solo che le linee di campo possono essere trattenute dall'esplodere dal ferro presente in una barra magnetica, ma che possono essere tenute insieme anche dalla gravità senza l'aiuto di alcun magnete. La ragione è semplice: il campo magnetico possiede dell'energia, e l'energia è soggetta alla gravità [per comprendere come mai, si ricordi che l'energia e la massa sono «equivalenti» (scheda 5.2): è possibile convertire una massa di qualsiasi tipo (uranio, idrogeno o qualsiasi altra cosa) in energia; e viceversa, è possibile convertire l'energia di qualsiasi tipo (energia magnetica, energia esplosiva o di qualsiasi altro tipo) in massa. Quindi, in un senso profondo, massa ed energia sono

7.1 – (a) Le linee del campo magnetico attorno a una barra magnetica, rese visibili dalla limatura di ferro sparsa su un foglio di carta posto sopra una calamita; (b) le stesse linee di campo senza il foglio e senza il magnete. La pressione esistente tra loro fa esplodere le linee di campo adiacenti nelle direzioni indicate dalle frecce ondulate; (c) un fascio cilindrico infinitamente lungo di linee del campo magnetico, il cui campo è così intenso che la sua energia crea una curvatura dello spaziotempo (gravità) sufficiente a tenere insieme il fascio malgrado la repulsione tra le linee di campo adiacenti; (d) l'ipotesi di Wheeler secondo cui quando il fascio di linee di campo in (c) viene leggermente compresso la sua gravità diventerebbe talmente forte da comprimere il fascio fino a farlo implodere (linee serpeggianti).

solo due nomi diversi della stessa cosa, e ciò significa che, poiché tutte le forme di massa producono gravità, anche tutte le forme di energia devono fare altrettanto. L'equazione di campo di Einstein, se esaminata attentamente, afferma questo]. Perciò un campo magnetico di enorme intensità – molto più intenso di quanto si sia mai visto sulla Terra – con la sua intensa energia produrrà una intensa gravità, e tale gravità comprimerà il campo; terrà insieme

le linee di campo malgrado la pressione esistente tra esse (figura 7.1c). Questa era la scoperta di Melvin.

L'intuizione diceva a Wheeler che queste linee di campo «legate gravitazionalmente» tra loro potevano essere instabili quanto una matita in equilibrio sulla punta: alla minima spintarella la gravità la farà cadere. Comprimete leggermente le linee del campo magnetico e la gravità supererà la loro pressione portandole a implodere (figura 7.1d). Implodere per diventare cosa? Forse un buco nero cilindrico infinitamente lungo, forse una singolarità nuda (una singolarità priva di un orizzonte che l'avvolga e la nasconda).

A Wheeler non importava che nell'Universo reale i campi magnetici fossero troppo deboli perché la gravità li tenesse insieme evitandone l'esplosione. L'obiettivo di Wheeler *non* era spiegare l'Universo così com'è, ma comprendere le leggi fondamentali che lo governano. Ponendo dei problemi astratti che spingono tali leggi all'estremo, si aspettava di ottenere nuove conoscenze su di esse. In quest'ottica, mi propose il mio primo problema di ricerca in materia gravitazionale: usa l'equazione di campo di Einstein per cercare di dedurre se il fascio di linee del campo magnetico di Melvin imploda e, nel caso, cosa diventi.

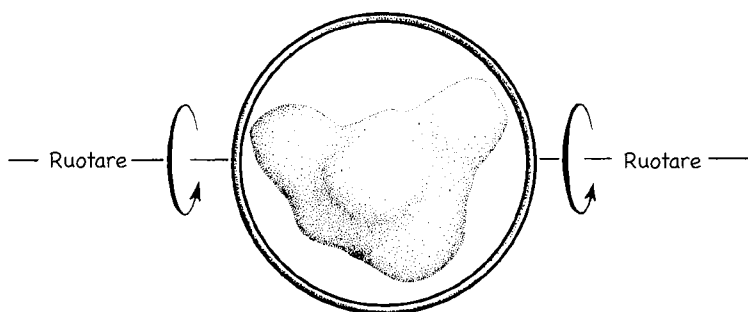
Mi affannai intorno a questo problema per mesi. Il campo quotidiano di battaglia era l'attico del laboratorio di fisica Palmer a Princeton, dove condividevo una grande stanza con altri studenti di fisica con i quali discutevamo i rispettivi problemi in uno spirito di collaborazione reciproca. Di notte, la battaglia si svolgeva nel piccolo appartamento in una caserma della Seconda Guerra Mondiale riconvertita in cui abitavo insieme a mia moglie Linda (artista e studentessa di matematica), a nostra figlia Kares e a un enorme Collie, Prince. Ogni giorno portavo il problema avanti e indietro insieme a me dalla ex-caserma al laboratorio sull'attico. A intervalli di qualche giorno mi rivolgevo a Wheeler per qualche consiglio. Martellavo il problema con carta e penna, con calcoli numerici al computer e in lunghe discussioni alla lavagna con i miei compagni di studi, e a poco a poco la verità emerse chiaramente. L'equazione di Einstein, maltrattata, manipolata e distorta dai miei tentativi, mi disse infine che l'ipotesi di Wheeler era sbagliata. Per quanto lo si comprimesse, il fascio cilindrico di linee del campo magnetico di Melvin riemergeva sempre. La gravità non poteva superare la pressione repulsiva del campo. Non c'era implosione.

Era il miglior risultato possibile, mi spiegò Wheeler entusiasta: quando un calcolo conferma le nostre aspettative, consolidiamo un po' la nostra conoscenza intuitiva delle leggi della fisica.

Wheeler e io ci rendemmo conto che il contrasto tra una stella sferica e il fascio cilindrico di linee del campo magnetico di Melvin era estremo: quando una stella sferica è molto compatta, la gravità al suo interno supera qualsiasi pressione interna cui essa possa fare ricorso. *L'implosione di una stella sferica massiva è obbligatoria* (capitolo V). Invece, a prescindere dalla forza con cui venga compresso un fascio cilindrico di linee del campo magnetico, a prescindere da quanto compatta si renda la sezione trasversale del fascio cilindrico (figura 7.1d), la pressione del cilindro supererà sempre la gravità e spingerà le linee di campo all'esterno. *L'implosione delle linee di un campo magnetico cilindrico è impossibile*, non può mai avvenire.

Perché le stelle sferiche e i campi magnetici cilindrici si comportano in modi tanto diversi? Wheeler mi incoraggiò a verificare la questione da ogni possibile punto di vista; la risposta avrebbe potuto portare a una profonda conoscenza delle leggi della fisica. Ma non mi disse in che modo effettuare la verifica. Stavo diventando un ricercatore indipendente; sarebbe stato meglio per me, egli riteneva, elaborare da solo la mia strategia di ricerca senza essere ulteriormente indirizzato da lui. L'indipendenza rafforza.

Dal 1963 al 1972, per la maggior parte dell'età dell'oro, mi dibattei nel tentativo di comprendere il contrasto tra le stelle sferiche e i campi magnetici cilindrici, ma solo saltuariamente. La questione era profonda e difficile, e c'erano altri argomenti più facili da studiare con il massimo impegno possibile: le pulsazioni delle stelle, gli effetti della curvatura dello spaziotempo sui grandi ammassi stellari e sulla loro implosione. In mezzo a questi studi, una o due volte l'anno tiravo fuori dal cassetto i raccoglitori che contenevano i miei calcoli sui campi magnetici. Gradualmente, li ampliai con quelli relativi ad altri oggetti cilindri astratti di lunghezza infinita: «stelle» cilindriche fatte di gas incandescenti, nubi cilindriche di polvere che implodono, o che ruotano e implodono simultaneamente. Sebbene questi oggetti non esistano nell'Universo reale, i calcoli relativi a essi, effettuati di tanto in tanto, mi portarono gradualmente a una maggiore comprensione.

Nel 1972 la verità era evidente: solo se un oggetto viene compresso in *tutte e tre* le sue direzioni spaziali, nord-sud, est-ovest e alto-basso (ad esempio se viene compresso sfericamente), la gravità può diventare così forte da superare ogni forma di pressione interna. Se invece l'oggetto viene compresso soltanto in due direzioni spaziali (ad esempio se viene compresso cilindricamente in un lungo filo sottile), la gravità acquista forza, ma non tanta da vincere la battaglia con la pressione. Una pressione assai modesta, dovuta a gas ad alta temperatura, alla degenerazione degli elettroni o alle linee del

7.2 – In base alla congettura del cerchio, un oggetto che implode forma un buco nero se e solo se un cerchio di circonferenza pari a quella critica può essere posto attorno all'oggetto e fatto ruotare.

campo magnetico, può facilmente superare la gravità e far esplodere l'oggetto cilindrico. E se l'oggetto viene compresso in una sola direzione, in una sottilissima frittella, la pressione supererà la gravità ancora più facilmente.

I miei calcoli lo dimostravano in modo chiaro e inequivocabile per le sfere, i cilindri infinitamente lunghi e le frittelle infinitamente estese. I calcoli relativi a tali oggetti erano fattibili. Erano invece assai più difficili – in effetti al di là delle mie capacità – quando riguardavano oggetti non sferici di dimensioni finite. Ma l'intuizione fisica che emergeva dai miei calcoli e da quelli dei miei giovani compagni mi diceva cosa potevo aspettarmi. Formulai questa aspettativa sotto forma di una «congettura del cerchio».

Prendete un oggetto di qualsiasi tipo, una stella, un ammasso di stelle, un fascio di linee di campo di un campo magnetico o qualsiasi altra cosa. Misurate la massa dell'oggetto, ad esempio, misurando la forza della sua attrazione gravitazionale sui pianeti orbitanti. Calcolate in base a tale massa la circonferenza critica dell'oggetto (18,5 chilometri per la massa dell'oggetto espressa in termini di masse solari). Se l'oggetto fosse sferico (cosa che non è) e dovesse implodere o venire compresso, formerebbe un buco nero, se venisse compresso al di sotto della circonferenza critica. Cosa accade se l'oggetto non è sferico? La congettura del cerchio pretende di darvi una risposta (figura 7.2).

Costruite un cerchio di circonferenza uguale a quella critica del vostro oggetto. Poi cercate di collocare l'oggetto al centro del cerchio e di far ruotare quest'ultimo completamente intorno all'oggetto. Se ci riuscite, l'oggetto deve aver già creato attorno a sé l'orizzonte di un buco nero. Se non ci riuscite, l'oggetto non è ancora abbastanza compatto da formare un buco nero.

In altre parole, la congettura del cerchio afferma che se un oggetto (una stella, un ammasso di stelle o qualsiasi altra cosa) viene compresso in modo altamente non sferico esso formerà un buco nero attorno a sé solo e soltanto se la sua circonferenza, in tutte le direzioni, è diventata più piccola della circonferenza critica.

Ho proposto la congettura del cerchio nel 1972. Da allora io e altri ci siamo impegnati duramente a scoprire se sia corretta o meno. La risposta è sepolta nell'equazione di campo di Einstein, ma estrarla si è rivelato eccessivamente difficile. Nel frattempo hanno continuato ad accumularsi prove indirette a favore della congettura del cerchio. Più recentemente, nel 1991, Stuart Shapiro e Saul Teukolsky alla Cornell University hanno simulato con un supercomputer l'implosione di una stella altamente non sferica e hanno visto dei buchi neri formarsi attorno alla stella implosa esattamente nel momento in cui la congettura del cerchio prevede che avvenga. Se si può infilare e far ruotare un cerchio intorno alla stella implosa, si forma un buco nero, se non si può, non c'è nessun buco nero. Ma sono state simulate solo poche di queste stelle e con forme non sferiche particolari. Pertanto, non sappiamo ancora con certezza, circa un quarto di secolo dopo che l'ho proposta, se la congettura del cerchio sia corretta, ma sembra promettere bene.

Igor Dmitrievich Novikov, per molti aspetti, era il mio corrispettivo sovietico, così come Yakov Borisovich Zel'dovich lo era di Wheeler. Nel 1962, mentre io incontravo Wheeler per la prima volta e iniziavo la mia carriera sotto la sua guida, Novikov incontrava per la prima volta Zel'dovich ed entrava a far parte della sua équipe di ricerca.

Mentre io muovevo i primi passi in un'atmosfera facile e collaborativa – essendo nato e cresciuto in una famiglia mormone numerosa e unita[2] a Logan, nello Utah – Igor Novikov se l'era passata male. Nel 1957, quando aveva due anni, suo padre, un alto dirigente del ministero delle Ferrovie a Mosca, rimase preso nelle maglie del Grande Terrore staliniano, venne arrestato e (con meno fortuna di Landau) giustiziato. A sua madre venne risparmiata la vita, finì in prigione e poi in esilio, e Igor crebbe con una zia (simili

tragedie familiari risalenti all'epoca di Stalin erano spaventosamente frequenti tra i miei amici e colleghi russi).

Nei primi anni Sessanta, mentre mi preparavo ad andare a studiare a Princeton e a dedicarmi alla ricerca sulla relatività generale con John Wheeler, uno dei miei professori del Caltech mi mise in guardia contro questa scelta: la relatività generale è poco rilevante per l'Universo reale, mi ammonì; bisognava rivolgersi altrove per trovare delle sfide interessanti nel campo della fisica (era l'epoca del diffuso scetticismo sui buchi neri e dello scarso interesse nei loro confronti). Allo stesso tempo, a Mosca, Igor stava ottenendo il suo *kandidat* (Ph.D.) con uno studio sulla relatività generale, e la moglie Nora, a sua volta fisica, veniva messa in guardia dagli amici perché la relatività era una palude priva di importanza per l'Universo reale. Suo marito, nell'interesse della sua carriera, avrebbe fatto meglio ad abbandonarla.

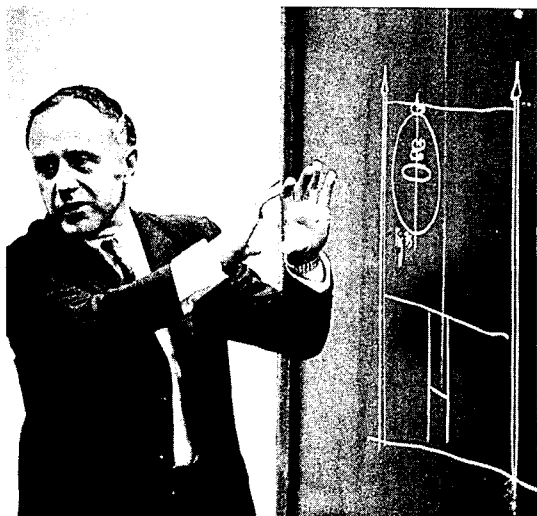
Mentre io ignoravo questi consigli e puntavo su Princeton, Nora, preoccupata dagli ammonimenti ricevuti, colse l'occasione di una conferenza di fisica in Estonia per chiedere un parere al famoso fisico Yakov Borisovich Zel'dovich. Lo cercò e gli chiese se riteneva che la relatività generale avesse qualche importanza. Zel'dovich, nel suo modo energico e dinamico, le rispose che la relatività sarebbe diventata estremamente importante per la ricerca in campo astrofisico. Allora Nora gli descrisse un'idea sulla quale stava lavorando il marito, secondo cui l'implosione di una stella che dava luogo a un buco nero poteva essere simile al Big Bang che aveva dato origine all'Universo, ma con il tempo invertito e fatto scorrere al contrario[3]. Mentre Nora parlava, Zel'dovich si esaltava sempre più. Lui stesso aveva avuto la stessa idea e la stava esplorando.

Qualche giorno dopo, Zel'dovich piombò in un ufficio che Igor Novikov condivideva con molti altri studenti all'Istituto astronomico Shternberg dell'Università di Mosca, e cominciò a torchiarlo sulla sua ricerca. Sebbene le loro idee fossero simili, i loro metodi di ricerca erano completamente diversi. Novikov, già un grande esperto in materia di relatività, aveva usato un elegante calcolo matematico per dimostrare la somiglianza tra il Big Bang e l'implosione stellare. Zel'dovich, che sapeva poco della relatività, l'aveva dimostrata ricorrendo a una profonda conoscenza della fisica e con calcoli rozzi. Era una combinazione ideale di talenti, e Zel'dovich se ne rese conto. Egli stava giusto uscendo dalla sua vita di inventore e progettista di armi nucleari e cominciava a mettere insieme una nuova équipe di ricerca per lavorare sulla sua nuova passione: l'astrofisica. Novikov, nella sua qualità di esperto delle relatività generale, sarebbe stato un membro ideale della sua équipe.

Quando Novikov, che si trovava bene all'Università di Mosca, esitò ad accettare l'offerta, Zel'dovich fece pressioni. Si recò da Mstislav Keldysh, il direttore dell'Istituto di matematica applicata dove stava formando la sua équipe; Keldovich telefonò a Ivan Petrovsky, il *Rektor* dell'Università di Mosca, e Petrovsky mandò a chiamare Novikov. Con una certa trepidazione, Novikov entrò nell'ufficio di Petrovsky, in cima alla torre centrale dell'Università, un luogo nel quale Novikov non avrebbe mai immaginato di avventurarsi. Petrovsky fu inequivocabile: «Forse lei *ora* non vuole lasciare l'Università per lavorare con Zel'dovich, ma lo *vorrà*». Novikov accettò e, nonostante alcuni momenti difficili, non se ne pentì mai.

Lo stile di Zel'dovich, come mentore di giovani astrofisici, era quello che aveva sviluppato lavorando con la sua équipe di progettazione degli armamenti nucleari: «Zel'dovich è la scintilla [delle idee] e la sua équipe la benzina» – a meno che, casualmente, qualche altro membro non fosse in grado di competere con lui nell'elaborare idee (Novikov lo fece abitualmente, quando si trattava di relatività). Allora Zel'dovich raccoglieva entusiasticamente l'idea del suo giovane collega e la faceva rimbalzare nella sua équipe in un energico botta e risposta, portandola rapidamente a maturazione e condividendone la paternità con il suo inventore.

Novikov ha dato una vivida descrizione dello stile di Zel'dovich. Chiamando il suo mentore per nome e patronimico (un modo russo di rivolgersi alle persone che denota rispetto e intimità al tempo stesso), Novikov dice: «Yakov Boris'ch spesso mi svegliava telefonandomi alle cinque o alle sei del mattino. "Ho una nuova idea! Una nuova idea! Vieni da me! Parliamo!". Io ci andavo e parlavamo a lungo, molto a lungo. Yakov Boris'ch pensava che tutti fossimo in grado di lavorare quanto lui. Lavorava con la sua équipe su un argomento dalle sei del mattino fino a, credo, le dieci. Poi su un altro fino a pranzo. Poi si faceva una breve passeggiata, o un po' di esercizio, o un breve sonnellino. Poi un caffè e di nuovo interazione fino alle cinque o alle sei. La sera eravamo liberi di fare calcoli, pensare o scrivere per preparare la giornata seguente».

Viziato dai giorni della progettazione nucleare, Zel'dovich continuava a chiedere che il mondo si adeguasse a lui: seguisse i suoi orari, iniziasse a lavorare quando iniziava lui, facesse la siesta quando la faceva lui (nel 1968 io, John Wheeler e Andrei Sakharov passammo un pomeriggio a discutere di fisica con lui nella stanza di un hotel nel profondo sud dell'Unione Sovietica. Dopo diverse ore di intensa discussione, Zel'dovich ci annunciò che era ora di fare un pisolino. Poi si sdraiò e dormì per venti minuti mentre io, Wheeler

In alto, a sinistra: John Archibald Wheeler, ca 1970. *In alto, a destra*: Igor Dmitrievich Novikov e Yakov Borisovich Zel'dovich nel 1962. *In basso*: Dennis Sciama nel 1955. [In alto a sinistra: per gentile concessione dei Joseph Henry Laboratories, Università di Princeton; in alto a destra: per gentile concessione di S. Chandrasekhar; in basso: per gentile concessione di Dennis W. Sciama]

e Sakharov ci rilassavamo e leggevamo tranquilli ognuno nel proprio angolo in attesa del suo risveglio).

Impaziente con i perfezionisti come me, che insistono per mettere a posto tutti i particolari di un determinato calcolo, Zel'dovich si interessava solo ai concetti principali. Come Oppenheimer, poteva gettare al vento i dettagli irrilevanti e non trasferirne nessuno, senza quasi mai sbagliare, negli aspetti centrali. Qualche freccia e qualche curva alla lavagna, un'equazione non più lunga di mezza riga, poche frasi di una vivida prosa: con questo avrebbe portato la sua équipe al cuore del problema di ricerca.

Era rapido a giudicare un'idea o il valore di un fisico, e lento a modificare i suoi giudizi. Poteva rimanere fedele per anni a un giudizio sbagliato dato frettolosamente, restando in tal modo cieco di fronte a importanti verità, come quando respinse l'idea che i buchi neri di piccole dimensioni potessero evaporare (capitolo XII). Ma quando (come di solito avveniva) i suoi giudizi affrettati erano giusti, lo mettevano in grado di procedere oltre le frontiere della conoscenza a un ritmo incredibile, più rapido di chiunque abbia mai conosciuto.

Il contrasto tra Zel'dovich e Wheeler era netto: Zel'dovich dava forma alla sua équipe con mano ferma, con un continuo bombardamento delle sue idee e lo sfruttamento comune delle idee dell'équipe. Wheeler offriva ai suoi pivelli un'atmosfera filosofica, la sensazione che ci fossero idee stimolanti tutt'intorno, pronte per essere colte, ma raramente instillava un'idea concreta in un allievo, e non si associava mai ai suoi allievi nel servirsi delle loro idee. L'obiettivo fondamentale di Wheeler era la formazione dei suoi cuccioli, anche se ciò rallentava il ritmo delle scoperte. Zel'dovich, ancora intriso dello spirito della corsa alla superbomba, inseguiva il ritmo più rapido possibile, a qualsiasi costo.

Zel'dovich chiamava al telefono a ore impossibili del mattino, chiedendo attenzione, interazione, progressi. Wheeler a noi, i suoi allievi, sembrava l'uomo più occupato del mondo, troppo preso dai suoi progetti per chiedere la nostra attenzione. Ma, se richiesto, era sempre pronto a elargire consigli, pareri, incoraggiamento.

Dennis Sciama, il terzo grande mentore dell'epoca, aveva uno stile ancora diverso. Egli si dedicò negli anni Sessanta e all'inizio degli anni Settanta quasi esclusivamente a creare nell'Università di Cambridge un ambiente ottimale per la crescita dei suoi studenti. Dato che mise in secondo piano la sua ricerca personale e la sua carriera, anteponendovi quelle dei suoi studenti, non otten-

ne mai il nobile titolo di «professore» a Cambridge (una posizione assai più elevata di quella di professore in America). Più che lui, furono i suoi studenti a raccogliere onori e ricompense. Alla fine degli anni Settanta, due dei suoi ex-studenti, Stephen Hawking e Martin Rees, erano professori a Cambridge.

Sciama era un catalizzatore, e teneva i suoi studenti a stretto contatto con i nuovi sviluppi più importanti della fisica in tutto il mondo. Ogni volta che veniva pubblicata una scoperta interessante, assegnava a uno studente il compito di leggere e riferire in materia agli altri. Ogni volta che era programmata una conferenza importante a Londra, accompagnava o spediva in treno i suoi studenti a seguirla. Aveva una grande capacità di individuare quali fossero le idee interessanti, i temi di cui bisognava occuparsi, le letture che bisognava fare per avviare un progetto di ricerca e le persone cui rivolgersi per chiedere consigli.

Sciama era animato da un disperato desiderio di sapere come è fatto l'Universo. Egli stesso ha descritto questa spinta come una specie di angoscia metafisica. L'Universo sembrava così folle, bizzarro e fantastico che l'unico modo per affrontarlo era cercare di capirlo, e il modo migliore per farlo era attraverso i suoi studenti. Facendo risolvere ai suoi studenti i problemi più impegnativi, poteva passare più rapidamente da un argomento all'altro che non se si fosse fermato a risolverli lui stesso.

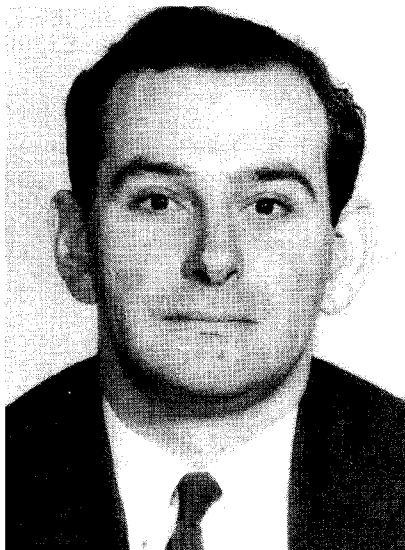
I buchi neri non hanno peli

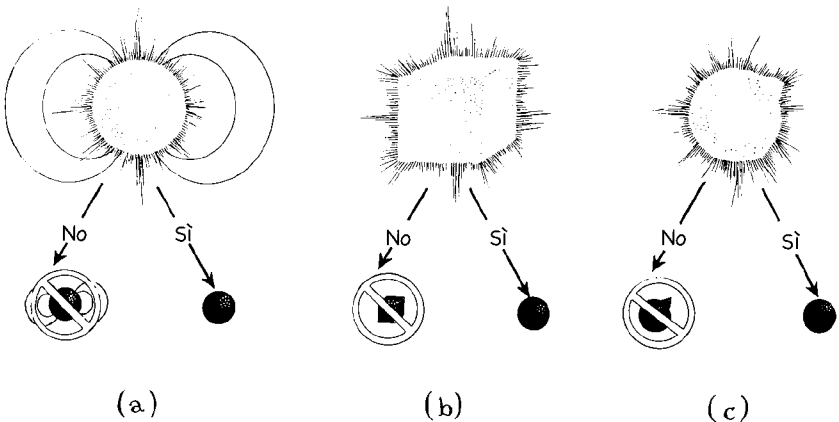
Fra le scoperte dell'età dell'oro, una delle più importanti era che «un buco nero non ha peli» (il significato di questa espressione si chiarirà gradualmente nelle pagine seguenti). Nella scienza alcune scoperte vengono fatte rapidamente, da singoli individui, altre emergono lentamente come frutto dei diversi contributi di molti ricercatori. Quella della mancanza di peli dei buchi neri era del secondo tipo. Essa è maturata grazie alle ricerche della progenie intellettuale di tutti e tre i grandi mentori, Zel'dovich, Wheeler e Sciama e a quelle di molti altri. Nelle pagine seguenti osserveremo questa miriade di ricercatori affannarsi passo dopo passo, frammento dopo frammento, a formulare il concetto di mancanza di peli dei buchi neri, dimostrarlo e dedurne le implicazioni.

I primi indizi del fatto che «un buco nero non ha peli» arrivarono nel 1964 da Vitaly Lazarevich Ginzburg, l'uomo che aveva inventato il combustibile LiD per la bomba sovietica all'idrogeno e che la supposta complicità della

moglie in un complotto per uccidere Stalin aveva sgravato dall'ulteriore lavoro di progettazione della bomba (capitolo VI). Gli astronomi del Caltech avevano appena scoperto i *quasar*, enigmatici oggetti esplosivi ubicati nei più lontani recessi dell'Universo, e Ginzburg stava cercando di capire cosa potesse alimentarli (capitolo IX). Una possibilità, pensava Ginzburg, poteva essere l'implosione di una stella magnetizzata supermassiva destinata a formare un buco nero. Le linee del campo magnetico di una simile stella avrebbero la forma indicata nella parte superiore della figura 7.3a, la stessa forma delle linee del campo magnetico sulla Terra. Quando la stella implode, le sue linee del campo potrebbero venire compresse con forza ed esplodere violentemente, con un enorme rilascio di energia, ipotizzava Ginzburg, e ciò avrebbe potuto contribuire a spiegare i quasar.

Verificare questa ipotesi calcolando tutti i dettagli dell'implosione della stella sarebbe stato eccessivamente difficile, perciò Ginzburg fece la seconda

A sinistra: Vitaly Lazarevich Ginzburg (ca. 1962), colui che fornì la prima prova della «congettura dell'assenza di peli». *A destra*: Werner Israel (nel 1964), colui che escogitò la prima prova rigorosa dell'esattezza della «congettura dell'assenza di peli». [A sinistra: per gentile concessione di Vitaly Ginzburg; a destra: per gentile concessione di Werner Israel].

cosa migliore che poteva fare. Come Oppenheimer nella sua prima esplorazione a grandi linee di cosa accade quando una stella implode (capitolo VI), Ginzburg esaminò una sequenza di stelle statiche, ognuna più compatta della precedente, e tutte con lo stesso numero di linee del campo magnetico che si dipanavano al loro interno. Questa sequenza di stelle statiche, ragionava Ginzburg, avrebbe dovuto imitare una singola stella che implodeva. Egli derivò una formula che descriveva le forme delle linee del campo magnetico per ogni stella della sua sequenza, ed ebbe una grande sorpresa. Quando una stella era prossima a raggiungere la sua circonferenza critica e si cominciava a formare un buco nero intorno a essa, la sua gravità risucchiava le linee del campo magnetico giù sulla sua superficie, fissandovele saldamente. Quando il buco nero si era formato, le linee di campo si trovavano già all'interno del suo orizzonte. Non restava nessuna linea di campo che sporgesse fuori dal buco (figura 7.3a). Ciò non era di buon auspicio per l'idea di Ginzburg sull'alimentazione dei quasar, ma suggeriva una possibilità affascinante:

7.3 – Alcuni esempi della «congettura dell'assenza di peli»; (a) quando una stella magnetizzata implode, il buco che forma è privo di campo magnetico; (b) quando una stella quadrata implode, il buco che forma è rotondo, non quadrato; (c) quando una stella con una montagna sulla sua superficie implode, il buco che forma non presenta montagne.

quando una stella magnetizzata implode e forma un buco nero, quest'ultimo potrebbe nascere senza alcun campo magnetico.

Più o meno mentre Ginzburg faceva questa scoperta, a pochi chilometri di distanza, a Mosca, l'équipe di Zel'dovich, capeggiata da Igor Novikov e Andrei Doroshkevich, cominciò a chiedersi: «Visto che una stella rotonda produce un buco rotondo quando implode, una stella deformata produrrà un buco deformato?». Per fare un esempio estremo, una stella quadrata produrrà un buco quadrato? (figura 7.3b). Effettuare i calcoli relativi all'implosione di una ipotetica stella quadrata sarebbe stato eccessivamente difficile, perciò Doroshkevich, Novikov e Zel'dovich si concentrarono su un esempio più semplice: quando una stella semisferica con una piccola montagna che spunta dalla sua superficie implode, formerà un buco che presenterà una protrusione sull'orizzonte simile a una montagna? Interrogandosi su una stella semisferica con una piccola montagna, l'équipe di Zel'dovich poteva semplificare enormemente i calcoli, e poteva utilizzare delle tecniche matematiche chiamate *metodi perturbativi* di cui John Wheeler e un postdoc, Tullio Regge, erano stati i pionieri qualche anno prima. Questi metodi perturbativi, illustrati a grandi linee nella scheda 7.1, erano stati progettati attentamente per lo studio di qualsiasi piccola «perturbazione» (qualsiasi piccolo disturbo) di una situazione altrimenti sferica. La distorsione gravitazionale dovuta a una piccola montagna sulla stella dell'équipe di Zel'dovich costituiva proprio una perturbazione del genere.

Doroshkevich, Novikov e Zel'dovich semplificarono ulteriormente i loro calcoli ricorrendo allo stesso trucco usato da Oppenheimer e Ginzburg; invece di simulare l'intera implosione dinamica di una stella dotata di una montagna, essi esaminarono una sequenza di stelle statiche montagnose, una più compatta della precedente. Grazie a questo escamotage, ai metodi perturbativi e agli intensi scambi reciproci tra loro, Doroshkevich, Novikov e Zel'dovich ottennero rapidamente un risultato notevole: quando una stella statica dotata di una montagna è abbastanza piccola da formare un buco nero attorno a sé, l'orizzonte del buco deve essere esattamente sferico, senza alcuna protrusione (figura 7.3c).

Per analogia, si era tentati di ipotizzare che se una stella quadrata che implodeva avesse formato un buco nero, anche il suo orizzonte sarebbe stato rotondo e non quadrato (figura 7.3b). Se questa ipotesi era corretta, un buco nero non avrebbe dovuto mostrare alcun indizio del fatto che la stella che gli aveva dato origine fosse quadrata, rotonda o con una montagna e (secondo Ginzburg) nemmeno che fosse magnetizzata o priva di magnetismo.

Scheda 7.1

UNA SPIEGAZIONE DEI METODI PERTURBATIVI PER LETTORI CHE AMANO L'ALGEBRA

Nell'algebra si impara a calcolare il quadrato di una somma di due numeri *a* e *b* in base alla formula

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

Supponiamo che *a* sia un numero molto grande, ad esempio 1000, e che *b* sia molto piccolo al confronto, ad esempio 3. Pertanto, il terzo termine della formula, b^2, sarà molto piccolo rispetto agli altri due e può essere eliminato senza che ciò comporti un errore particolarmente rilevante:

$$\begin{aligned}(1000 + 3)^2 &= 1000^2 + 2 \times 1000 \times 3 + 3^2 = 1{,}006{,}009 \\ &\simeq 1000^2 + 2 \times 1000 \times 3 = 1{,}006{,}000\end{aligned}$$

I metodi perturbativi si basano su questa approssimazione. L'$a = 1000$ è come una stella perfettamente sferica, $b = 3$ è come la piccola montagna della stella, e $(a + b)^2$ è come la curvatura dello spaziotempo prodotta dalla stella e dalla montagna insieme. Nel calcolare questa curvatura, i metodi perturbativi tengono conto solo degli effetti che sono lineari per le proprietà della montagna (effetti come $2ab = 6000$, che è lineare per $b = 3$); questi metodi tralasciano tutti gli effetti della montagna (effetti come $b^2 = 9$). Finché la montagna è piccola rispetto alla stella, i metodi perturbativi sono molto precisi. Tuttavia, se la montagna dovesse diventare grande quanto il resto della stella (come dovrebbe fare per rendere la stella quadrata anziché tonda) i metodi perturbativi darebbero luogo a gravi errori, come quello che risulterebbe dalla formula precedente per $a = 1000$ e $b = 1000$:

$$\begin{aligned}(1000 + 1000)^2 &= 1000^2 + 2 \times 1000 \times 1000 + 1000^2 = 4.000.000 \\ &\not\simeq 1000^2 + 2 \times 1000 \times 1000 = 3.000.000\end{aligned}$$

Questi due risultati differiscono significativamente tra loro.

Qualche anno più tardi, quando questa ipotesi si sarebbe rivelata corretta, John Wheeler coniò un'espressione efficace per descriverla: *un buco nero non ha peli*, dove per peli si intende qualsiasi cosa che potrebbe sporgere dal buco per rivelare i dettagli della stella che gli ha dato origine.

È arduo per la maggior parte dei colleghi di Wheeler credere che un uomo conservatore e beneducato come lui fosse consapevole dell'interpretazione lasciva della sua espressione. Ma io sono di opinione diversa. Alcune rare volte ho notato, in privato, la sua vena maliziosa[4]. L'espressione di Wheeler fece rapidamente presa, malgrado le resistenze di Simon Pasternak, caporedattore della «Physical Review», la rivista che pubblicava la maggior parte delle ricerche occidentali sui buchi neri. Quando Werner Israel cercò di usare l'espressione in un articolo tecnico alla fine del 1969, Pasternak si affrettò a scrivere una nota perentoria nella quale affermava che in nessuna circostanza avrebbe consentito simili oscenità sulla sua rivista. Ma Pasternak non poté contenere a lungo la marea di articoli «senza peli». In Francia e in Unione Sovietica, dove la traduzione dell'espressione di Wheeler era a sua volta considerata sgradevole, le resistenze durarono più a lungo. Verso la fine degli anni Settanta, tuttavia, l'espressione di Wheeler veniva usata e pubblicata dai fisici di tutto il mondo, in tutte le lingue, senza neppure l'accenno di una smorfia infantile.

Era l'inverno del 1964-1965 quando Ginzburg, Doroshkevich, Novikov e Zel'dovich inventarono la loro *congettura senza peli* e raccolsero le prove per sostenerla. Una volta ogni tre anni gli esperti della relatività generale si riunivano in qualche parte del mondo per una conferenza scientifica di una settimana per scambiare idee e comunicare i risultati delle rispettive ricerche. La quarta di queste conferenze si sarebbe tenuta a Londra nel mese di giugno.

Nessuno nell'équipe di Zel'dovich aveva mai viaggiato oltre i confini del blocco comunista. Zel'dovich stesso non sarebbe certamente stato autorizzato a espatriare; il suo contatto con la ricerca sugli armamenti nucleari era troppo recente. Novikov, tuttavia, era troppo giovane per essere stato coinvolto nella progettazione della bomba all'idrogeno, la sua conoscenza della relatività generale era superiore a quella di chiunque altro dell'équipe (che era il motivo principale per cui Zel'dovich lo aveva reclutato), era ormai il capitano di quella squadra (Zel'dovich era l'allenatore), e il suo inglese era passabile, anche se non lo parlava affatto correntemente. Logico che la scelta ricadesse su di lui.

Era un buon periodo per le relazioni tra Est e Ovest. La morte di Stalin, avvenuta una dozzina di anni prima, aveva attivato gradualmente una ripresa

della corrispondenza e delle visite tra gli scienziati sovietici e i loro colleghi occidentali (anche se non con la libertà di cui si godeva negli anni Venti e Trenta, prima che calasse la cortina di ferro staliniana). Ora era normale che l'Unione Sovietica inviasse una piccola delegazione di scienziati a ogni conferenza internazionale di rilievo. L'invio di queste delegazioni era importante non solo per mantenere vitale la scienza sovietica, ma anche per dimostrare agli scienziati occidentali il valore di quelli sovietici. Dai tempi degli zar, i burocrati russi nutrivano un complesso di inferiorità rispetto all'Occidente; per essi era molto importante poter andare a testa alta di fronte all'opinione pubblica occidentale e mostrare con orgoglio i successi della propria nazione.

Perciò fu facile per Zel'dovich, che si era procurato un invito a Londra per Novikov affinché tenesse uno degli interventi più importanti alla Conferenza sulla relatività, convincere i burocrati a inserire il suo giovane collega nella delegazione sovietica. Novikov aveva molte cose impressionanti su cui riferire, e avrebbe dato un'immagine molto positiva del valore della fisica sovietica.

A Londra, Novikov tenne un intervento di un'ora e mezza di fronte a un pubblico composto da trecento dei principali fisici del mondo impegnati sulla relatività. Il suo intervento fu un tour de force. I risultati dell'implosione gravitazionale di una stella dotata di una montagna ne occuparono solo una piccola parte; il resto era una serie di contributi altrettanto rilevanti alla nostra conoscenza sulla gravità relativistica, le stelle di neutroni, l'implosione stellare, i buchi neri, la natura dei quasar, le radiazioni gravitazionali e l'origine dell'Universo. Mentre ascoltavo Novikov a Londra, ero sbalordito dalla vastità e dall'incisività della ricerca svolta dall'équipe di Zel'dovich. Non avevo mai visto nulla di simile.

Dopo il suo intervento mi unii alla folla entusiasta che si assiepava attorno a Novikov e scoprii, con gran piacere, che il mio russo era un po' meglio del suo inglese e che c'era bisogno di me come interprete della discussione. Quando la folla si assottigliò io e Novikov ce ne andammo insieme per continuare la discussione privatamente. Iniziò così una delle mie più belle amicizie.

A Londra non era possibile, per me e per nessun altro, assorbire interamente i particolari dell'analisi svolta dall'équipe di Zel'dovich sulla mancanza di peli dei buchi neri. Erano troppo complessi. Dovevamo attendere una versione scritta del loro lavoro, in cui i particolari fossero illustrati accuratamente.

Tale versione giunse a Princeton nel settembre del 1965, in russo. Ancora una volta fui contento di aver dedicato tante ore noiose alle lezioni di russo prima di laurearmi. L'analisi scritta era articolata in due parti. La prima,

chiaramente opera di Doroshkevich e Novikov, era una dimostrazione matematica del fatto che quando una stella statica con una piccola montagna diventa sempre più compatta vi sono due soli risultati possibili. O la stella crea un buco nero esattamente sferico attorno a sé, o la montagna produce una curvatura dello spaziotempo talmente enorme, mentre la stella si avvicina alla sua circonferenza critica, che i suoi effetti non costituiscono più una «piccola perturbazione»; in tal caso il metodo di calcolo non è più adatto e il risultato dell'implosione è sconosciuto. La seconda parte dell'analisi era quello che avrei presto imparato a riconoscere come un argomento «tipicamente alla Zel'dovich». Se la montagna inizialmente è piccola, è *intuitivamente ovvio* che essa *non può* produrre una curvatura enorme quando la stella si avvicina alla sua circonferenza critica. Questa possibilità va allora scartata. L'altra deve essere vera: la stella produce un buco nero esattamente sferico.

Ciò che era intuitivamente ovvio per Zel'dovich (e alla fine si sarebbe rivelato vero) era lontano dall'esserlo per la maggior parte dei fisici occidentali. La controversia cominciò a infuriare.

La potenza dei risultati di una ricerca controversa è enorme. Essa attira i fisici come il miele le mosche. E così fu con la prova dell'assenza di peli dei buchi neri fornita dall'équipe di Zel'dovich. I fisici all'inizio si avvicinarono uno alla volta, e poi in massa.

Il primo fu Werner Israel, nato a Berlino, cresciuto in Sudafrica, divenuto esperto nelle leggi della relatività in Irlanda e all'epoca impegnato a organizzare un gruppo di ricerca sulla relatività a Edmonton, in Canada. Impegnandosi a fondo, Israel perfezionò la prima parte della prova sovietica, quella di Doroshkevich e Novikov: egli analizzò non solo le montagne piccole, come avevano fatto i sovietici, ma anche quelle di ogni forma e dimensione. In effetti i suoi calcoli funzionavano correttamente per *qualsiasi* implosione, a prescindere dal fatto che fosse molto o poco non sferica, o addirittura quadrata, e permettevano all'implosione di essere dinamica, e non solo una sequenza astratta di stelle statiche. Altrettanto notevole era la conclusione di Israel, che era simile a quella di Doroshkevich e Novikov, ma molto più decisa: un'implosione altamente non sferica può dar luogo a due soli risultati: o non produce affatto un buco nero, o produce un buco nero esattamente sferico. Ma affinché tale conclusione fosse vera, il corpo che implodeva doveva possedere due proprietà speciali: doveva essere completamente privo di carica elettrica e non doveva minimamente ruotare. Le ragioni appariranno chiare in seguito.

Israel presentò la sua analisi e i relativi risultati per la prima volta l'8 febbraio 1967, in una conferenza al Kings College di Londra. Il titolo era un po' enigmatico, ma Dennis Sciama a Cambridge invitò caldamente i suoi studenti a recarsi a Londra ad assistervi. Come ricorda George Ellis, uno di quegli studenti: «Fu una conferenza molto, molto interessante. Israel dimostrò un teorema mai sentito, del tutto inaspettato, neanche lontanamente simile a qualcosa di già visto». Quando Israel stava per concludere la sua conferenza, Charles Misner (un ex-studente di Wheeler) si alzò in piedi e propose una riflessione: cosa accade se la stella ruota e ha una carica elettrica? Anche in quel caso ci possono essere solo due possibilità: nessun buco, o un buco con un'unica forma, interamente determinata dalla massa, dalla rotazione e dalla carica della stella? La risposta sarebbe infine stata sì, ma non prima che l'intuizione di Zel'dovich venisse verificata.

Zel'dovich, Doroshkevich e Novikov, come ricorderete, avevano studiato delle stelle non molto deformate, ma quasi sferiche, con delle piccole montagne. La loro analisi e le affermazioni di Zel'dovich sollevavano una gran quantità di domande.

Se una stella che implode ha una piccola montagna sulla sua superficie, qual è il risultato dell'implosione? La montagna produce un'enorme curvatura dello spaziotempo, quando la stella si avvicina alla sua circonferenza critica (il risultato intuitivamente scartato da Zel'dovich)? Oppure l'influenza della montagna scompare, lasciando dietro di sé un buco nero perfettamente sferico (l'opzione preferita da Zel'dovich)? E se si forma un buco nero perfettamente sferico, come fa a liberarsi dell'influenza gravitazionale della montagna? *Cosa fa diventare sferico il buco?*

In quanto allievo di Wheeler, riflettei su tali questioni. Tuttavia, non le consideravo una sfida per me stesso, quanto per i miei studenti. Era ormai il 1968, avevo ottenuto il Ph.D. a Princeton ed ero tornato alla mia università di provenienza, il Caltech, prima come postdoc e poi come professore, e iniziavo a costruire intorno a me un entourage di studenti come quello di Wheeler a Princeton.

Richard Price, un giovane poderoso dalla barba rossa che veniva da Brooklyn, del peso di un quintale e cintura nera di karate, aveva già lavorato con me in diversi piccoli progetti di ricerca, tra cui uno in cui venivano usati i metodi matematici necessari per rispondere a quelle domande: i metodi perturbativi. Egli era ormai abbastanza maturo per affrontare un progetto più impegnativo. La verifica dell'intuizione di Zel'dovich sembrava ideale,

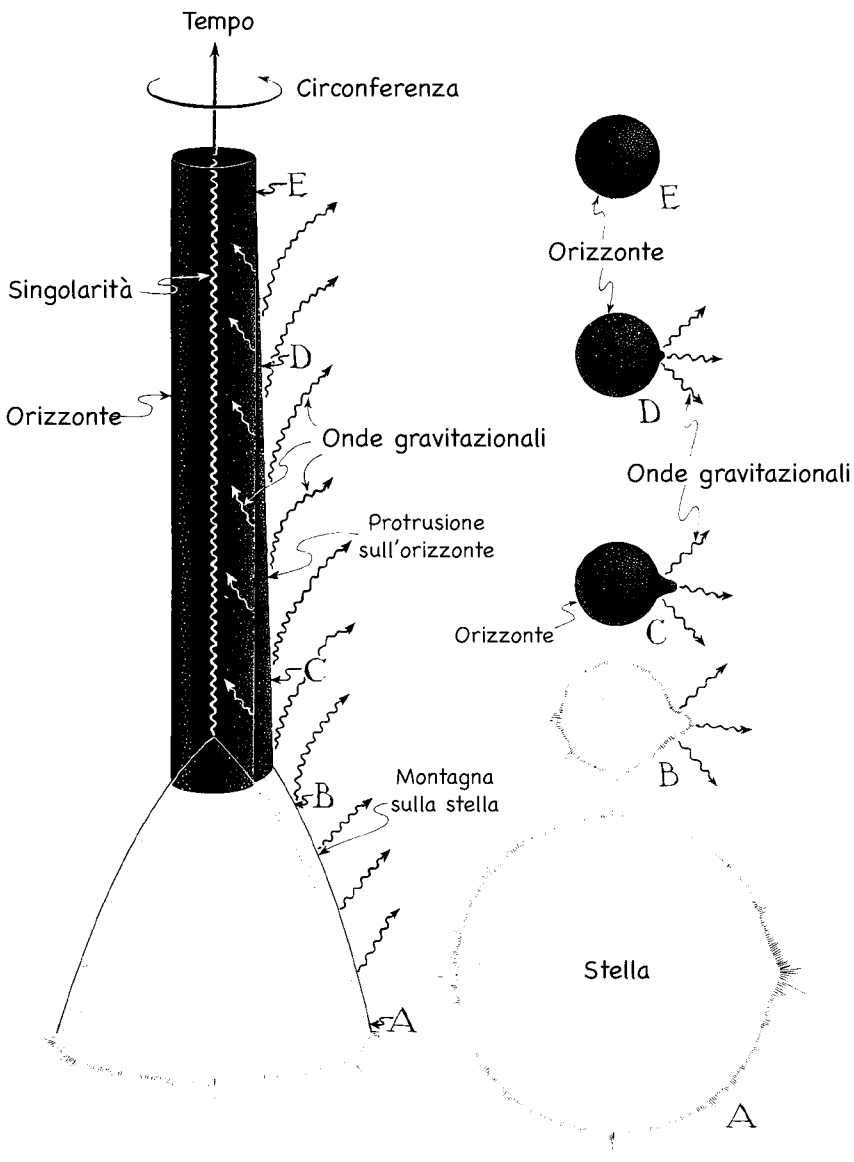
tranne per un aspetto. Era un argomento scottante; altri se ne stavano occupando altrove; le mosche cominciavano a darsi da fare col miele. Price avrebbe dovuto fare in fretta.

Non lo fece. Altri trovarono prima le risposte. Vi arrivò per terzo, dopo Novikov e dopo Israel, ma vi arrivò in modo più solido e completo e con una conoscenza più approfondita.

La scoperta di Price venne immortalata da Jack Smith, un commentatore ricco di spirito del «Los Angeles Times». Nel numero del 27 agosto 1970 Smith descrisse la visita fatta il giorno prima al Caltech «Dopo il pranzo al Circolo della Facoltà, me ne andai in giro da solo per il campus. Sentivo aleggiare nell'aria pensieri profondi. Perfino in estate scuotevano gli ulivi. Guardai attraverso una finestra. C'era una lavagna coperta di equazioni, fitte come foglie su un sentiero, e tre frasi in inglese: *Teorema di Price: tutto ciò che può essere irradiato viene irradiato. Osservazione di Schutz: tutto ciò che viene irradiato può essere irradiato. Le cose possono essere irradiate se e solo se vengono irradiate.* Ripresi a camminare e mi chiesi come avrebbe influito in autunno l'arrivo delle ragazze al Caltech per la prima volta. Non credo che faranno alcun danno… ho proprio idea che saranno radiose».

La citazione richiede qualche spiegazione. L'«osservazione di Schutz» era una battuta, ma il teorema di Price «tutto ciò che può essere irradiato viene irradiato» era una seria conferma di un'ipotesi di Roger Penrose del 1969.

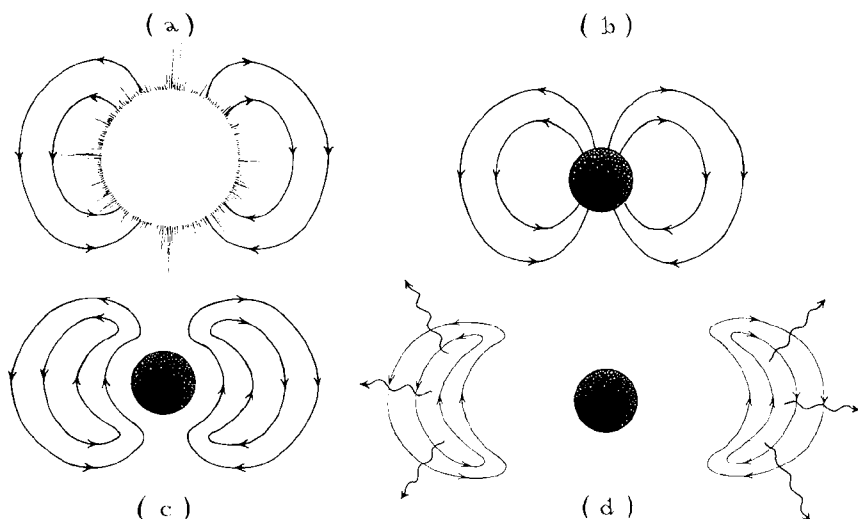
Il teorema di Price è illustrato dall'implosione di una stella dotata di montagna, rappresentata nella figura 7.4. La parte sinistra della figura è un diagramma spaziotemporale del tipo introdotto con la figura 6.7 del capitolo VI; la parte destra è una sequenza di istantanee della forma della stella e dell'orizzonte in successione temporale, con le fasi iniziali in fondo e quelle finali in cima.

Quando la stella implode (le due istantanee sul fondo nella figura 7.4), la sua montagna diventa più grande, provocando una crescente distorsione a forma di montagna nella curvatura dello spaziotempo. Poi, quando la stella sprofonda al di sotto della sua circonferenza critica e crea l'orizzonte di un buco nero attorno a sé, la curvatura distorta dello spaziotempo deforma l'orizzonte con una protrusione simile a una montagna. La protrusione dell'orizzonte, tuttavia, non può sopravvivere a lungo. La montagna stellare che l'ha generata si trova ormai all'interno del buco, perciò l'orizzonte non può più avvertirne l'influenza. L'orizzonte non è più costretto dalla montagna a mantenere la sua protrusione e la espelle nell'unico modo possibile: la converte in increspature della curvatura dello spaziotempo (onde gravitazionali;

7.4 – Diagramma spaziotemporale (a sinistra) e sequenza di istantanee (a destra) raffiguranti l'implosione di una stella dotata di montagna che dà luogo a un buco nero.

capitolo X) che si propagano in tutte le direzioni (le due istantanee in alto). Alcune delle increspature scendono nel buco, altre si dileguano nell'Universo circostante e, così facendo, le increspature lasciano il buco con una forma perfettamente sferica.

Un'analogia familiare è quella di una corda di violino che viene pizzicata. Finché il dito la preme, la corda resta deformata; finché la montagna spunta fuori dal buco, l'orizzonte appena formatosi resta deformato. Quando si toglie il dito, la corda vibra emettendo onde sonore nella stanza; esse trasportano altrove l'energia proveniente dalla deformazione della corda e quest'ultima riprende una forma diritta. Analogamente, quando sprofonda all'interno del buco, la montagna non può più mantenere l'orizzonte deformato, quindi l'orizzonte vibra emettendo onde gravitazionali che trasportano altrove l'energia della deformazione dell'orizzonte, e quest'ultimo assume una forma perfettamente sferica.

Che relazione c'è tra questa implosione con montagna e il teorema di Price? Secondo le leggi della fisica, la protrusione a forma di montagna dell'orizzonte *può* essere convertita in onde gravitazionali (increspature della curvatura). Il teorema di Price ci dice, invece, che la protrusione *deve* essere convertita in onde gravitazionali, e che questa irradiazione deve far scomparire completamente la protrusione. *Questo è il meccanismo che rende il buco nero privo di peli.*

Il teorema di Price ci dice non solo che un buco deformato perde la sua deformazione, ma anche come un buco magnetizzato perde il suo campo magnetico (figura 7.5; in questo caso il meccanismo era già chiaro prima del teorema di Price grazie a una simulazione al computer fatta da Werner Israel e due dei suoi studenti canadesi, Vicente de la Cruz e Ted Chase). Il buco magnetizzato viene creato dall'implosione di una stella magnetizzata. Prima che l'orizzonte inghiotta la stella che sta implodendo, il campo magnetico è saldamente ancorato all'interno di quest'ultima; correnti elettriche presenti dentro la stella impediscono al campo di fuggire. Dopo che la stella è stata ingoiata dall'orizzonte (figura 7.5b) il campo non può più avvertire le correnti elettriche della stella, ed esse non lo trattengono più. Ora il campo permea l'orizzonte anziché la stella, ma l'orizzonte come ancoraggio non vale granché. Le leggi della fisica permettono al campo di trasformarsi in radiazioni elettromagnetiche (increspature della forza magnetica ed elettrica), e pertanto il teorema di Price richiede che lo faccia (figura 7.5c). La radiazione elettromagnetica vola via, in parte entra nel buco e in parte se ne allontana, lasciandolo smagnetizzato (figura 7.5d).

7.5 – Una sequenza di istantanee che mostrano l'implosione di una stella magnetizzata (a) che dà luogo a un buco nero (b). Il buco inizialmente eredita il campo magnetico dalla stella. Tuttavia, il buco non ha la forza per trattenere il campo. Esso scivola via (c), viene convertito in radiazioni elettromagnetiche e si dilegua (d).

Se, come abbiamo visto, le montagne possono essere irradiate via, e anche i campi magnetici, cosa rimane? Cosa *non può* essere trasformato in radiazioni? La risposta è semplice: tra le leggi della fisica vi è un insieme speciale chiamato *leggi di conservazione*. Secondo tali leggi, vi sono determinate quantità che non possono mai oscillare o vibrare in modo radiativo, e pertanto non possono mai essere convertite in radiazioni ed essere espulse dalle vicinanze di un buco nero. Queste quantità che vengono conservate sono l'attrazione gravitazionale dovuta alla massa del buco, il vortice spaziale dovuto alla rotazione (discusso qui di seguito) e le linee del campo elettrico che puntano radialmente verso l'esterno (discusse qui di seguito) dovute alla carica elettrica del buco[5].

Perciò, secondo il teorema di Price, l'influenza della massa, della rotazione e della carica del buco sono le sole cose che possono rimanere quando tutte le radiazioni sono sparite. Tutte le altre caratteristiche del buco saranno scomparse, portate via dalle radiazioni. Ciò significa che nessuna misurazione possibile delle proprietà del buco definitivo potrà mai rivelare le caratteristiche

della stella che lo ha creato implodendo, a parte la massa, la velocità di rotazione e la carica. Dalle proprietà del buco non si può nemmeno stabilire (secondo i calcoli di James Hartle e Jacob Bekenstein, entrambi allievi di Wheeler) se la stella che ha dato vita al buco fosse fatta di materia o di antimateria, di protoni ed elettroni, o di neutrini e antineutrini. Per usare l'espressione di Wheeler, in modo più preciso, un buco nero non ha *quasi* peli; i suoi unici «peli» sono la massa, la velocità di rotazione e la carica elettrica.

La prova solida e definitiva del fatto che un buco nero non ha peli (a parte la massa, la velocità di rotazione e la carica elettrica), in realtà non fu fornita da Price. L'analisi di Price si limitava alle stelle in fase di implosione quasi perfettamente sferiche e che ruotano, se ruotano, molto lentamente. I metodi perturbativi da lui utilizzati richiedevano queste restrizioni. Per conoscere il destino finale di una stella in fase di implosione molto deformata e che ruota a grande velocità si richiedeva una serie di tecniche matematiche molto diverse dai metodi perturbativi.

Gli studenti di Dennis Sciama a Cambridge erano maestri nelle tecniche richieste, ma esse erano estremamente difficili. Usando queste tecniche, gli studenti di Sciama e i loro discendenti intellettuali impiegarono quindici anni per produrre una prova solida e completa del fatto che i buchi non hanno peli: anche se un buco ruota velocemente ed è fortemente deformato dalla sua rotazione, le sue proprietà finali (dopo che tutte le radiazioni sono state emesse) sono determinate solo dalla sua massa, dalla sua rotazione e dalla sua carica. Il merito della prova va per la maggior parte a due degli studenti di Sciama, Brandon Carter e Stephen Hawking, e a Werner Israel; ma importanti contributi sono arrivati anche da David Robinson, Gary Bunting e Pavel Mazur.

Nel capitolo III ho commentato la grande differenza esistente tra le leggi della fisica del nostro Universo reale e la società delle formiche del romanzo epico di T.H. White *The Once and Future King*. Le formiche di White sono governate dal motto «Tutto ciò che non è vietato è obbligatorio», ma le leggi della fisica violano questa regola in maniera eclatante. Molte cose consentite dalle leggi della fisica sono talmente improbabili che non accadono mai. Il teorema di Price è una eccezione degna di nota. È una delle poche situazioni che io abbia mai incontrato nella fisica in cui domina il motto delle formiche: se le leggi fisiche non vietano a un buco nero di emettere qualcosa sotto forma di radiazioni, l'emissione è obbligatoria.

Altrettanto inusuali sono le implicazioni che derivano dall'assenza di peli di un buco nero. Di solito i fisici costruiscono modelli teorici o informatici semplificati per comprendere la complessità dell'Universo che ci circonda. Per aiutarci a capire il tempo, i fisici dell'atmosfera costruiscono modelli informatici della circolazione atmosferica terrestre. Per contribuire a capire come funzionano i terremoti, i geofisici costruiscono semplici modelli teorici degli slittamenti delle rocce. Come aiuto alla comprensione dell'implosione stellare, Oppenheimer e Snyder nel 1939 costruirono un semplice modello teorico: una nube di materia in fase di implosione perfettamente sferica, perfettamente omogenea e del tutto priva di pressione. Quando costruiamo simili modelli, noi fisici siamo pienamente consapevoli dei loro limiti. Essi non sono che pallide immagini della complessità che abbonda «là fuori», nell'Universo «reale».

Non è così per un buco nero, almeno non è così una volta che le radiazioni sono volate via trasportando fuori tutti i «peli» del buco. Allora il buco è così eccessivamente semplice che possiamo descriverlo mediante semplici, precise formule matematiche. Non abbiamo bisogno di alcuna semplificazione astratta. Ciò non vale per nessun altro luogo nel mondo macroscopico (ossia su scale più grandi di una particella subatomica). In nessun altro luogo ci si può attendere che la nostra matematica sia tanto precisa. In nessun altro possiamo liberarci dei limiti dei modelli astratti.

Perché i buchi neri sono così diversi da ogni altro oggetto dell'Universo macroscopico? Perché essi e solo essi sono di una così elegante semplicità? Se la conoscessi, questa risposta mi rivelerebbe probabilmente qualcosa di molto profondo sulle leggi della fisica. Ma non la conosco. Forse i fisici della prossima generazione riusciranno a scoprirla.

I buchi neri ruotano e pulsano

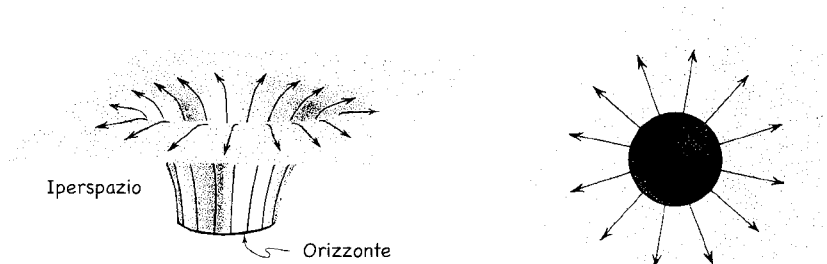
Quali sono le proprietà dei buchi neri senza peli, descritte in maniera così perfetta dalla matematica della relatività generale?

Se creiamo un modello ideale di buco nero assolutamente privo di carica elettrica e di rotazione, otteniamo esattamente il buco sferico che abbiamo visto nei capitoli precedenti. Esso è descritto matematicamente dalla soluzione data nel 1916 da Karl Schwarzschild all'equazione di campo di Einstein (capitoli III e VI).

Se si immette la carica elettrica in un buco di questo tipo, esso acquisisce

una sola nuova caratteristica: le linee del campo elettrico che si diramano radialmente come gli aculei di un porcospino. Se la carica è positiva, queste linee spingono fuori dal buco i protoni e attirano gli elettroni; se è negativa, le linee espellono gli elettroni e attirano i protoni. Un buco dotato di carica come questo è descritto matematicamente, con assoluta precisione, da una soluzione dell'equazione di campo di Einstein trovata da un fisico tedesco e da uno olandese, Hans Reissner e Gunnar Nordström rispettivamente nel 1916 e nel 1918. Ma all'epoca nessuno comprese la rilevanza per la fisica della soluzione di Reissner e Nordström, e fu così fino al 1960, quando due degli studenti di Wheeler, John Graves e Dieter Brill, scoprirono che essa descrive un buco nero dotato di carica.

Possiamo raffigurare la curvatura dello spazio intorno a un buco nero dotato di carica e le linee del suo campo elettrico usando un diagramma a incasso (a sinistra nella figura 7.6). Questo diagramma è essenzialmente identico alla parte in basso a destra della figura 3.4, ma senza la stella (la porzione nera della figura 3.4), poiché essa si trova ormai dentro il buco nero e non ha più contatti con l'Universo esterno. Per essere più precisi, questo diagramma raffigura il «piano» equatoriale – una parte bidimensionale dello spazio del buco – esterno al buco nero, incassato in un iperspazio tridimensionale piatto (per una illustrazione del significato di questi diagrammi si veda la figura 3.3 e il testo che l'accompagna). Il «piano» equatoriale è interrotto dall'orizzonte del buco e perciò vediamo solo l'esterno di quest'ultimo e non l'interno. L'oriz-

7.6 – Linee del campo elettrico che emergono dall'orizzonte di un buco nero dotato di carica elettrica. Sinistra: Diagramma a incasso. Destra vista del diagramma a incasso dall'alto.

Scheda 7.2
L'ORGANIZZAZIONE DELLA SCIENZA SOVIETICA E DI QUELLA OCCIDENTALE: CONTRASTI E CONSEGUENZE

Mentre io e i giovani fisici miei colleghi ci affannavamo a elaborare la congettura del cerchio, a dimostrare che i buchi neri non hanno peli e a scoprire in che modo li perdano, al tempo stesso andavamo scoprendo quanto la fisica fosse organizzata in modo diverso nell'Urss rispetto all'Inghilterra e all'America e gli effetti profondi esercitati da tali differenze. Quanto abbiamo appreso allora può essere utile per pianificare il futuro, specialmente nell'ex-Unione Sovietica, dove tutte le istituzioni statali – scientifiche, governative ed economiche – stanno oggi (1993) faticosamente cercando di riorganizzarsi secondo schemi occidentali. Il modello occidentale non è assolutamente perfetto, e il sistema sovietico non era completamente sbagliato!

In America e in Inghilterra vi è un flusso costante di giovani talenti in un'équipe di ricerca come quelle di Wheeler o di Sciama. I laureati possono unirsi alle équipe per il loro anno conclusivo, ma poi vengono inviati altrove per il dottorato. Quelli che lo hanno conseguito si inseriscono nelle équipe per un periodo fra i tre e i cinque anni e poi vengono mandati a seguire gli studi post-dottorato. I postdoc vi si inseriscono a loro volta per due o tre anni e poi vengono mandati altrove per fondare una loro équipe di ricerca (come ho fatto io al Caltech) o per unirsi a un piccolo nucleo attivo altrove. In Inghilterra e in America non è consentito quasi a nessuno, per quanto talento possa avere, restare sotto l'ala dei suoi mentori.

Nell'Urss, invece, giovani fisici eccellenti, come Novikov, vi restavano dieci, venti e a volte trenta o quarant'anni. Un grande mentore sovietico, come Zel'dovich o Landau, lavorava in un istituto dell'Accademia delle Scienze, anziché in una università, con un carico di ore di insegnamento ridotto o nullo; trattenendo i propri studenti migliori, egli creava attorno a sé un'équipe permanente di ricercatori a tempo pieno, uniti tra loro ed estremamente efficaci, e che potevano restare con lui anche fino al termine della sua carriera.

Alcuni dei miei amici sovietici attribuivano questa differenza alle carenze del sistema angloamericano: quasi tutti i grandi fisici inglesi o americani lavorano nelle università dove la ricerca è spesso subordinata all'insegnamento

e dove i posti permanenti sono in numero insufficiente a permettere di creare un'équipe di ricercatori solida e duratura. Di conseguenza, non vi è stata *nessuna* équipe di ricerca in fisica teorica in America o in Inghilterra che potesse paragonarsi a quella di Landau tra gli anni Trenta e Cinquanta o a quella di Zel'dovich negli anni Sessanta e Settanta. In questo senso, l'Occidente non aveva speranza di competere con l'Unione Sovietica.

Alcuni dei miei amici americani attribuivano questa differenza alle carenze del sistema sovietico: era molto difficile, logisticamente, spostarsi da un istituto all'altro e da una città all'altra nell'Urss, perciò i giovani fisici erano costretti a restare con i loro mentori, non avevano opportunità di allontanarsene e avviare delle équipe indipendenti. Il risultato, affermavano i critici, era un sistema feudale. Il mentore era come il signore e i membri dell'équipe come i servi, legati da rapporti di dipendenza per la maggior parte della loro carriera. Il signore e i servi erano interdipendenti tra loro in modo complesso, ma era chiaro chi comandava. Se il signore era un maestro abile e ingegnoso come Landau o Zel'dovich, l'équipe padrone/servo poteva rivelarsi altamente produttiva. Se il padrone era autoritario e non particolarmente brillante (come era di solito), il risultato poteva essere tragico: uno spreco di talento e una vita miserabile per i servi.

Nel sistema sovietico, ogni grande mentore, come Zel'dovich, creava una

zonte, che in realtà è la superficie di una sfera, appare come un cerchio nel diagramma perché ne vediamo solo l'equatore. Il diagramma mostra le linee del campo elettrico che fuoriescono radialmente dall'orizzonte. Se osserviamo il diagramma dall'alto (parte destra della figura 7.6), non vediamo la curvatura dello spazio, ma vediamo più chiaramente le linee del campo elettrico.

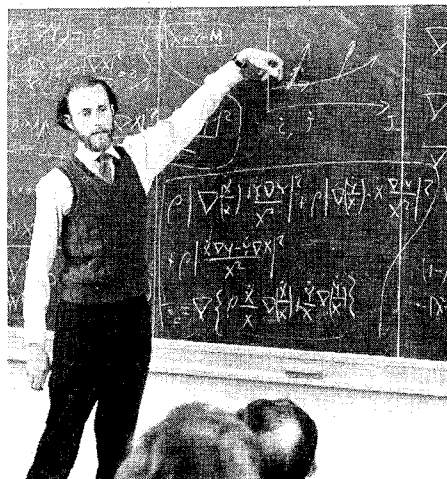
Gli effetti della rotazione di un buco nero non sono stati compresi fino alla fine degli anni Sessanta. Le nuove scoperte si devono in gran parte a Brandon Carter, uno degli studenti di Sciama all'Università di Cambridge.

Quando Carter si unì al gruppo di Sciama nell'autunno del 1964, questi gli suggerì immediatamente come primo tema di ricerca lo studio dell'implosione di stelle realistiche e dotate di rotazione. Sciama gli spiegò che tutti i calcoli precedenti dell'implosione riguardavano delle stelle astratte e non rotanti, ma che ormai il tempo e gli strumenti sembravano quelli giusti per andare all'assalto degli effetti della rotazione. Un matematico neozelandese di

sola équipe di ricerca, ma di estrema efficacia, senza uguali in nessuna parte dell'Occidente. Al contrario, i grandi mentori americani o inglesi, come Wheeler o Sciama, avevano una progenie fatta di molte équipe di ricerca più piccole e meno efficaci disseminate per il Paese, ma capaci di esercitare un ampio impatto cumulativo sulla fisica. I mentori americani e inglesi hanno un'affluenza costante di giovani che li aiutano ad avere una mente aperta e delle idee brillanti. Nei rari casi in cui i mentori sovietici volevano ricominciare da capo, dovevano spezzare il legame con la loro vecchia équipe in un modo che poteva risultare assai traumatico.

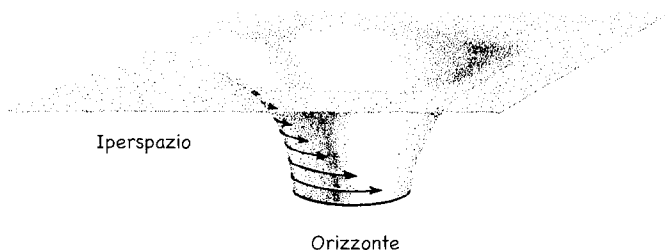
Questo infatti era ciò che doveva capitare a Zel'dovich. Egli cominciò a costruire la sua équipe di astrofisici nel 1961; nel 1964 essa era superiore a ogni altra équipe di fisica teorica di qualsiasi parte del mondo; poi nel 1978, subito dopo la fine dell'età dell'oro, ci fu una separazione traumatica, esplosiva, in cui quasi ogni membro dell'équipe di Zel'dovich andò per una strada e lui per un'altra, psicologicamente ferito ma libero da impedimenti, libero di ripartire da capo. Purtroppo, la sua rifondazione non avrebbe avuto successo. Non sarebbe mai più stato circondato da un'équipe così ricca di talento e così efficace come quella che aveva guidato con l'assistenza di Novikov. Ma Novikov, ormai indipendente, sarebbe emerso negli anni Ottanta come l'abile direttore di una ricostituita équipe.

nome Roy Kerr aveva appena pubblicato un articolo in cui forniva una soluzione all'equazione di campo di Einstein che sembrava descrivere la curvatura dello spaziotempo all'esterno di una stella rotante. Si trattava della prima soluzione per una stella rotante che fosse mai stata trovata. Purtroppo, spiegò Sciama, era una soluzione molto particolare e sicuramente non poteva descrivere *tutte* le stelle rotanti. Le stelle rotanti hanno molti «peli» (molte caratteristiche quali forme complicate e movimenti interni complicati dei loro gas), e la soluzione di Kerr non ne aveva affatto tanti: le forme della sua curvatura dello spaziotempo erano molto omogenee e semplici, troppo semplici per corrispondere a delle tipiche stelle rotanti. Malgrado ciò, la soluzione di Kerr dell'equazione di campo di Einstein era un punto da cui partire.

Pochi temi di ricerca hanno le ricadute immediate che ha avuto questo: nel giro di un anno Carter dimostrò matematicamente che la soluzione di Kerr non descrive una stella rotante, ma un buco nero rotante (questa sco-

A sinistra: Roy Kerr, ca. 1975. *A destra*: Brandon Carter mentre tiene una lezione sui buchi neri in una scuola estiva sulle Alpi francesi nel giugno del 1972. [A sinistra: per gentile concessione di Roy Kerr; a destra: foto di Kip Thorne].

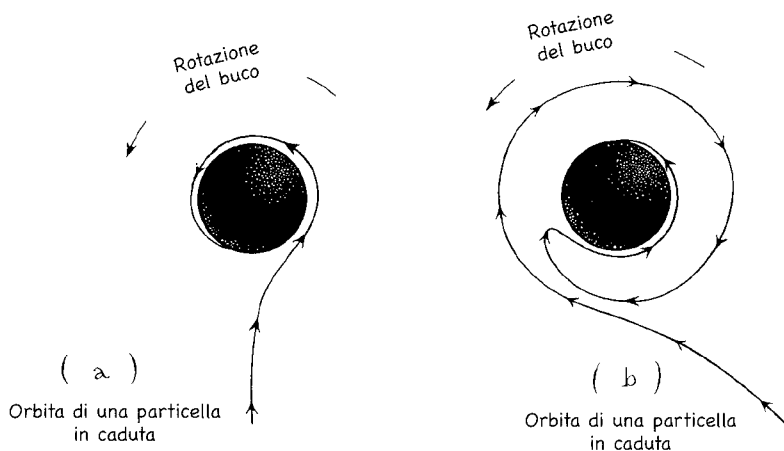
perta venne fatta in modo indipendente anche da Roger Penrose a Londra, e da Robert Boyer a Liverpool, e da Richard Lindquist, un ex-studente di Wheeler che lavorava alla Wesleyan University a Middleton, nel Connecticut). Verso la metà degli anni Settanta, Carter e altri erano giunti a dimostrare che la soluzione di Kerr descrive non solo un tipo speciale di buco nero rotante, ma tutti i buchi neri rotanti possibilmente esistenti.

Le proprietà fisiche di un buco nero rotante sono contenute nella matematica della soluzione di Kerr, e Carter, scandagliandola a fondo, scoprì quali erano. Una delle più interessanti è un vortice simile a un ciclone che il buco crea nello spazio attorno a sé.

Il vortice è raffigurato nel diagramma a incasso della figura 7.7. La superficie a forma di cono di tromba è il piano equatoriale del buco (una parte bidimensionale dello spazio del buco) inserito in un iperspazio piatto tridimensionale. La rotazione del buco fa presa sullo spazio circostante (la superficie a cono di tromba) e lo obbliga a ruotare in modo simile a un ciclone, a velocità proporzionali alla lunghezza delle frecce riportate sul diagramma. Lontano dall'occhio del ciclone l'aria ruota lentamente e, analogamente, lontano dal-

7.7 – Un diagramma a incasso che mostra il «vortice tipo ciclone» dello spazio creato dalla rotazione di un buco nero.

l'orizzonte del buco lo spazio ruota lentamente. In prossimità dell'occhio del ciclone l'aria ruota velocemente e, analogamente, vicino all'orizzonte lo spazio ruota velocemente. All'orizzonte, lo spazio è saldamente bloccato al suo interno: esso ruota esattamente alla stessa velocità alla quale ruota l'orizzonte.

Questo vortice di spazio ha un'influenza inesorabile sui movimenti delle particelle che precipitano dentro il buco. La figura 7.8 mostra le traiettorie di due di esse viste dal quadro di riferimento di un osservatore statico esterno, ossia dal quadro di un osservatore che non precipita oltre l'orizzonte e dentro il buco.

La prima particella (figura 7.8a) frana delicatamente dentro il buco. Se il buco non ruotasse, la particella, come la superficie di una stella che implode, si muoverebbe radialmente verso l'interno sempre più velocemente, dapprima; ma poi, vista dall'osservatore statico esterno, rallenterebbe la sua caduta e resterebbe congelata esattamente all'orizzonte (si ricordino le «stelle congelate» del capitolo VI). La rotazione del buco modifica questa situazione in un modo molto semplice: la rotazione fa vorticare lo spazio, e il vortice spaziale fa ruotare la particella, man mano che si avvicina all'orizzonte, in sintonia con l'orizzonte stesso. Quindi, la particella rimane congelata nella rotazione dell'orizzonte e, vista da un osservatore statico esterno, continua a girare intorno assieme all'orizzonte per sempre (analogamente, quando una stella rotante implode per dare vita a un buco nero rotante, vista da un osservatore statico esterno, la superficie della stella si «congela» nella rotazione dell'orizzonte, girando assieme a esso per sempre).

7.8 – Le traiettorie nello spazio di due particelle scagliate verso un buco nero (le traiettorie sono quelle che verrebbero misurate in un quadro di riferimento statico esterno). Malgrado i movimenti iniziali molto diversi, entrambe le particelle sono trascinate dal vortice spaziale esattamente nella stessa rotazione in sintonia con quella del buco man mano che si avvicinano all'orizzonte.

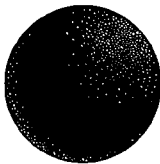
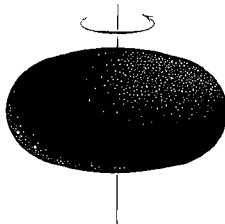
Mentre gli osservatori esterni vedono la particella della figura 7.8a congelarsi nella rotazione dell'orizzonte e restarvi per sempre, la particella stessa vede uno spettacolo ben diverso. Man mano che essa si avvicina all'orizzonte, la dilatazione gravitazionale obbliga il tempo della particella a scorrere sempre più lentamente rispetto a quello di un quadro di riferimento statico esterno. Trascorsa una quantità infinita di tempo esterno, la particella ha sperimentato soltanto il passaggio di una quantità finita e molto piccola di tempo. In quel tempo finito la particella ha raggiunto l'orizzonte del buco e nei pochi momenti successivi del suo tempo si tuffa dritta nell'orizzonte e giù verso il centro del buco. L'enorme differenza tra la caduta della particella vista dalla particella stessa e vista da osservatori esterni è del tutto analoga alla differenza tra l'implosione stellare vista dalla superficie della stella (rapida caduta oltre l'orizzonte) o vista da osservatori esterni (congelamento dell'implosione; si veda l'ultima parte del capitolo VI).

La seconda particella (figura 7.8b) viene scagliata verso il buco lungo una

traiettoria a spirale rivolta verso l'interno che ruota in senso opposto a quello del buco. Tuttavia, man mano che si avvicina all'orizzonte, il vortice spaziale fa presa sulla particella e ne inverte il movimento rotatorio. Come la prima particella, essa viene obbligata a seguire una rotazione in sintonia con l'orizzonte, dal punto di vista di osservatori esterni.

Oltre a creare un vortice nello spazio, la sua rotazione distorce anche l'orizzonte del buco nero in modo molto analogo a quello in cui la rotazione della Terra distorce la superficie della Terra. Le forze centrifughe spingono l'equatore della Terra che ruota verso l'esterno facendolo sporgere di ventidue chilometri rispetto ai suoi poli. Analogamente, le forze centrifughe fanno rigonfiare in fuori l'orizzonte all'altezza dell'equatore nel modo indicato nella figura 7.9. Se il buco non ruota, il suo orizzonte è sferico (parte sinistra della figura). Se ruota rapidamente il suo orizzonte si rigonfia notevolmente verso l'esterno (parte destra della figura).

Se il buco avesse una rotazione estremamente rapida, le forze centrifughe strapperebbero via il suo orizzonte in modo simile a quello in cui fanno uscire fuori l'acqua da un secchio quando quest'ultimo viene fatto ruotare rapidamente. Esiste pertanto una velocità massima di rotazione alla quale il buco può sopravvivere. Il buco della parte destra della figura 7.9 ruota al 58% del suo massimo.

7.9 – La forma dell'orizzonte di due buchi neri, uno (a sinistra) che non ruota, e l'altro (a destra) che ruota al 58% della sua velocità massima. L'effetto della rotazione sulla forma dell'orizzonte è stato scoperto nel 1973 da Larry Smarr, uno studente della Stanford University su suggerimento di Wheeler.

È possibile far ruotare un buco oltre la sua velocità massima consentita distruggendone l'orizzonte e dando in tal modo uno sguardo al suo interno? Sfortunatamente, no. Nel 1986, un decennio dopo l'età dell'oro, Werner Israel dimostrò che se si cercasse, con qualunque metodo, di far ruotare il buco a una velocità superiore al suo massimo, non ci si riuscirebbe. Ad esempio, se si cerca di far accelerare un buco che sta ruotando alla massima velocità gettandovi dentro della materia che ruota molto rapidamente, le forze centrifughe impedirebbero a essa di raggiungere l'orizzonte e penetrare nel buco. Aspetto forse più pertinente, qualsiasi minima interazione casuale tra un buco che ruota alla massima velocità e l'Universo circostante (ad esempio, l'attrazione gravitazionale di stelle distanti) ne rallenterebbe la rotazione. Le leggi della fisica, sembra, non vogliono permettere a nessuno che si trovi all'esterno di un buco di sbirciarvi dentro e scoprire i segreti della gravità quantistica custoditi nella singolarità al centro del buco (capitolo XIII).

Per un buco della massa del Sole il tasso di rotazione massimo è una rivoluzione ogni 0,000062 secondi (62 microsecondi). Dato che la circonferenza del buco è pari a circa 18,5 chilometri, ciò corrisponde a una velocità di rotazione di circa (18,5 chilometri)/(0,000062 secondi), che è quasi la velocità della luce, 299.792 chilometri al secondo (non del tutto una coincidenza!). Un buco la cui massa è pari a un milione di Soli ha una circonferenza un milione di volte più grande di un buco di massa pari a quella del Sole, perciò il suo tasso massimo di rotazione (il tasso che lo fa ruotare quasi alla velocità della luce) è un milione di volte più piccolo, una rivoluzione ogni 62 secondi.

Nel 1969 Roger Penrose (sul quale apprenderemo molte cose nel capitolo XIII) fece una scoperta meravigliosa. Lavorando sulle equazioni della soluzione di Kerr all'equazione di campo di Einstein egli scoprì che un buco nero rotante immagazzina *energia rotazionale* nel vortice dello spazio attorno a sé, e poiché l'energia del vortice si trova *all'esterno* dell'orizzonte del buco, e non all'interno, questa energia può essere effettivamente estratta e utilizzata per alimentare qualcosa. La scoperta di Penrose era meravigliosa perché (come avrebbe dimostrato in seguito Demetrios Christodoulou) l'energia rotazionale del buco è immensa. Se il buco ruota al suo massimo tasso possibile, la sua efficienza nell'immagazzinare e rilasciare energia è 48 volte maggiore di quella di tutto il combustibile nucleare del Sole. Se bruciasse tutto il suo combustibile nucleare (in realtà non lo brucerà *tutto*), il Sole riuscirebbe a convertire solo una frazione pari allo 0,006 della sua massa in luce e calore. Se si estraesse tutta l'energia rotazionale di un buco che ruota

velocemente (arrestandone con ciò la rotazione) si otterrebbe una quantità di energia utilizzabile pari a 48 x 0,006 = 29% della massa del buco.

Sorprendentemente, i fisici hanno impiegato sette anni a scoprire un metodo pratico attraverso il quale la natura può estrarre l'energia rotazionale di un buco e utilizzarla. I fisici hanno passato in rassegna un metodo folle dietro l'altro, ognuno dei quali poteva funzionare in linea di principio, ma nessuno dei quali sembrava promettente sul piano pratico, finché finalmente non hanno scoperto l'astuzia della natura. Nel capitolo IX descriverò questa ricerca e questa scoperta, e i suoi risultati: una «macchina» basata sui buchi neri per alimentare quasar e getti giganteschi.

Se, come abbiamo visto, la carica elettrica produce linee del campo elettrico che fuoriescono radialmente dall'orizzonte di un buco, e la rotazione dà luogo a un vortice nello spazio intorno al buco, a una distorsione della forma dell'orizzonte e all'immagazzinamento di energia, cosa accade quando un buco oltre a ruotare è anche dotato di carica elettrica? Purtroppo la risposta non è di un interesse spettacolare, contiene poche informazioni nuove. La carica del buco produce le consuete linee del campo elettrico. La rotazione del buco crea il consueto vortice spaziale, immagazzina la consueta energia rotazionale, e fa rigonfiare l'equatore del buco nel modo consueto. Le sole cose nuove sono delle poco interessanti linee del campo magnetico create dal vortice spaziale nel suo scorrere attraverso il campo elettrico (queste linee di campo *non sono* una nuova forma di «peli» sul buco; sono solo una manifestazione dell'interazione delle vecchie forme standard di peli: l'interazione del vortice provocato dalla rotazione con il campo elettrico dovuto alla carica elettrica). Tutte le proprietà di un buco nero rotante e dotato di carica elettrica sono contenute in un'elegante soluzione dell'equazione di campo di Einstein ottenuta nel 1965 da Ted Newman dell'Università di Pittsburgh e da un gruppo di suoi studenti: Eugene Couch, K. Chinnapared, Albert Exton, A. Prakash e Robert Torrence.

I buchi non solo possono ruotare, possono anche pulsare. Le loro pulsazioni, tuttavia, sono state scoperte matematicamente solo quasi un decennio dopo la loro rotazione: la scoperta era impedita da un potente blocco mentale.

Per tre anni (1969-1971) la progenie di John Wheeler aveva «guardato» pulsare i buchi neri e non sapeva cosa stesse vedendo. La progenie era composta da Richard Price (mio allievo e quindi nipote intellettuale di Wheeler), C.V. Vishveshwara e Lester Edelstein (allievi di Charles Misner all'Università

del Maryland, e quindi a loro volta nipoti intellettuali di Wheeler), e Frank Zerilli (allievo dello stesso Wheeler a Princeton).

Vishveshwara, Edelstein, Price e Zerilli osservarono i buchi neri pulsare nelle loro simulazioni al computer e nei calcoli fatti con carta e penna. Ciò che pensavano di vedere era la radiazione gravitazionale (increspature della curvatura dello spaziotempo) che rimbalzava in prossimità di un buco nero, intrappolata dalla curvatura dello spaziotempo del buco stesso. Non si trattava di una completa prigionia; le increspature fuoriuscivano lentamente dalle vicinanze del buco e si disperdevano. Era curioso, ma non di grande interesse.

Nell'autunno del 1971 Bill Press, un nuovo allievo del mio gruppo che aveva completato il dottorato, si rese conto che le increspature della curvatura dello spaziotempo che rimbalzavano attorno in prossimità di un buco potevano essere pensate come pulsazioni del buco nero stesso. Dopotutto, visto dal di fuori del suo orizzonte, il buco non consiste che in una curvatura dello spaziotempo. Le increspature quindi non erano niente di più e niente di meno che le pulsazioni della curvatura del buco e, pertanto, pulsazioni del buco stesso.

Questo cambiamento di punto di vista ebbe un impatto enorme. Se pensiamo che i buchi neri siano in grado di pulsare viene naturale chiedersi se vi siano somiglianze tra le loro pulsazioni e le pulsazioni (la «risonanza») di una campana, o quelle di una stella. Prima dell'intuizione di Press non ci si poneva queste domande. Dopo, divennero ovvie.

Una campana e una stella hanno delle frequenze naturali alle quali esse amano pulsare (le frequenze naturali di una campana producono il suono limpido dei suoi rintocchi). Esistono analoghe frequenze naturali alle quali i buchi neri amano pulsare? Sì, scoprì Press utilizzando le simulazioni al computer. Questa scoperta spinse Chandrasekhar, insieme a Stephen Detweiler (un pronipote intellettuale di Wheeler), a intraprendere un progetto di catalogazione di tutte le frequenze naturali di pulsazione di un buco nero. Torneremo su queste frequenze, i suoni simili a rintocchi di un buco nero, nel capitolo X.

Quando una ruota d'automobile che gira rapidamente è lievemente disallineata, essa può iniziare a vibrare e le sue vibrazioni possono cominciare a estrarre energia dalla rotazione e usare tale energia per aumentare sempre più. Le vibrazioni possono acquistare in effetti tanta forza da strappare via, in casi estremi, la ruota dalla macchina. I fisici descrivono questo fenomeno dicendo che «le vibrazioni della ruota sono instabili». Bill Press era consapevole di questo e di un comportamento analogo da parte delle stelle rotanti,

pertanto, quando scoprì che i buchi neri possono pulsare, gli venne naturale domandarsi «se un buco nero ruota rapidamente, le sue pulsazioni saranno instabili? Estrarranno energia dalla rotazione del buco e la useranno per aumentare sempre più, e possono aumentare tanto da distruggere il buco?». Chandrasekhar (che non era ancora profondamente immerso nella ricerca sui buchi neri) pensava di sì. Io pensavo di no. Nel novembre del 1971 facemmo una scommessa.

Gli strumenti per decidere la scommessa non esistevano ancora. Che tipo di strumenti ci occorrevano? Dato che le pulsazioni sarebbero iniziate debolmente e sarebbero andate aumentando in modo graduale (semmai fossero aumentate), potevano essere considerate come piccole «perturbazioni» della curvatura dello spaziotempo del buco, come le vibrazioni di un bicchiere da vino che viene fatto tintinnare sono piccole perturbazioni della forma del bicchiere. Ciò significava che le pulsazioni del buco potevano essere analizzate ricorrendo ai metodi perturbativi, la cui concezione è stata descritta nella precedente scheda 7.1. Tuttavia, i metodi perturbativi specifici che Price, Press, Vishveshwara, Chandrasekhar e altri stavano usando nell'autunno del 1971, funzionavano solo per le perturbazioni di buchi neri *non* rotanti o che ruotavano solo molto lentamente. Ciò di cui avevano bisogno erano metodi perturbativi completamente nuovi adatti alle perturbazioni riguardanti buchi neri che ruotavano rapidamente.

La creazione di tali metodi era un tema molto sentito nel 1971 e nel 1972. I miei allievi, quelli di Misner, quelli di Wheeler e Chandrasekhar con il suo allievo John Friedman lavoravano tutti su questo argomento, così come facevano anche altri. La competizione era aspra. Il vincitore fu Saul Teukolsky, un mio allievo sudafricano.

Teukolsky ricorda vividamente la scena in cui le equazioni del suo metodo andarono a posto. «A volte, quando uno si mette a giocare con la matematica, la mente comincia a riconoscere degli schemi», dice. «Ero lì seduto al tavolo della cucina nel nostro appartamento a Pasadena una sera di maggio del 1972 che giocavo con la matematica, e mia moglie Roz stava preparando delle crepes in una padella al Teflon che, in teoria, non doveva attaccare. Le crepe continuavano ad attaccarsi. Ogni volta che vi versava dentro la pastella, batteva la padella sul ripiano del banco. Imprecava e sbatteva e io le gridavo di star calma perché ero nervoso; i termini matematici stavano cominciando ad annullarsi l'un l'altro nelle mie formule. Si stavano annullando tutti! Le equazioni stavano andando a posto! Mentre sedevo a guardare le mie equazioni sorprendentemente semplici sentivo dentro di me quanto ero

stato stupido, ci sarei potuto riuscire sei mesi prima; tutto quello che avrei dovuto fare era mettere insieme i termini giusti».

Con le equazioni di Teukolsky si poteva analizzare qualsiasi tipo di problema: le frequenze naturali delle pulsazioni dei buchi neri, la stabilità delle pulsazioni di un buco, la radiazione gravitazionale che si produce quando una stella di neutroni viene inghiottita da un buco nero e altro ancora. Queste analisi, e l'estensione dei metodi di Teukolsky, vennero immediatamente intraprese da un piccolo esercito di ricercatori: Alexi Starobinsky (allievo di Zel'dovich), Bob Wald (allievo di Wheeler), Jeff Cohen (allievo di Dieter Brill, che era stato a sua volta allievo di Wheeler) e da molti altri. Lo stesso Teukolsky insieme a Bill Press si occupò del problema principale: la stabilità delle pulsazioni dei buchi neri.

Le loro conclusioni, frutto di un mix di calcoli effettuati al computer e mediante formule, erano deludenti: per quanto velocemente possa ruotare, le pulsazioni di un buco nero sono stabili[6]. Le pulsazioni estraggono effettivamente energia rotazionale dal buco ma irradiano anche energia sotto for-

Un party a casa di Mama Kovács a New York, dicembre 1972. *Da sinistra*: Kip Thorne, Margaret Press, Bill Press, Roselyn Teukolsky e Saul Teukolsky. [Per gentile concessione di Sándor J. Kovács].

ma di onde gravitazionali; e il tasso al quale esse irradiano l'energia è sempre maggiore del tasso al quale la estraggono dalla rotazione del buco. La loro energia pulsazionale pertanto si affievolisce sempre. Non aumenta mai e quindi il buco non può essere distrutto dalle sue pulsazioni.

Chandrasekhar, insoddisfatto delle conclusioni di Press e Teukolsky a causa della loro dipendenza dai calcoli al computer, rifiutò di considerare persa la nostra scommessa. Solo quando la prova intera fosse stata ottenuta direttamente dalla formula si sarebbe convinto del tutto. Quindici anni dopo Bernard Whiting, un ex-postdoc di Hawking (e quindi nipote intellettuale di Sciama) fornì tale prova, e Chandrasekhar gettò la spugna[7].

Chandrasekhar è ancora più perfezionista di me. Lui e Zel'dovich si trovano agli estremi opposti dello spettro del perfezionismo. Così nel 1975, quando i giovani dell'età dell'oro dichiararono quest'ultima terminata e abbandonarono in massa la ricerca sui buchi neri, Chandrasekhar rimase infastidito. Quei giovani avevano spinto i metodi di Teukolsky abbastanza in là da dimostrare che probabilmente i buchi neri sono stabili, ma non li avevano perfezionati dando a essi una forma che altri fisici avrebbero potuto usare per calcolare automaticamente *tutti* i dettagli di *qualsiasi* perturbazione dei buchi neri, si trattasse di pulsazioni, di onde gravitazionali di una stella di neutroni che vi precipitava dentro, l'effetto bomba in un buco nero, o qualsiasi altra cosa. Questa incompletezza era irritante.

Perciò Chandrasekhar nel 1975, all'età di sessantacinque anni, riversò tutta la forza della sua maestria matematica sulle equazioni di Teukolsky. Con energia inesauribile e intuizione matematica, egli procedette, attraverso la matematica complessa, a organizzarle in una forma che è stata definita «rococò: sfarzosa, gioiosa e immensamente elaborata». Infine, nel 1983, all'età di settantatré anni portò a termine il suo compito e pubblicò un trattato intitolato *The Mathematical Theory of Black Holes*, un trattato che sarebbe stato il manuale di matematica dei ricercatori sui buchi neri per i decenni a venire, un manuale da cui essi avrebbero potuto ricavare metodi per risolvere qualsiasi perturbazione dei buchi neri che avesse catturato la loro fantasia.

VIII. LA RICERCA

Dove un metodo
per individuare i buchi neri nel cielo
viene proposto e applicato
e (probabilmente) si rivela valido

Il metodo

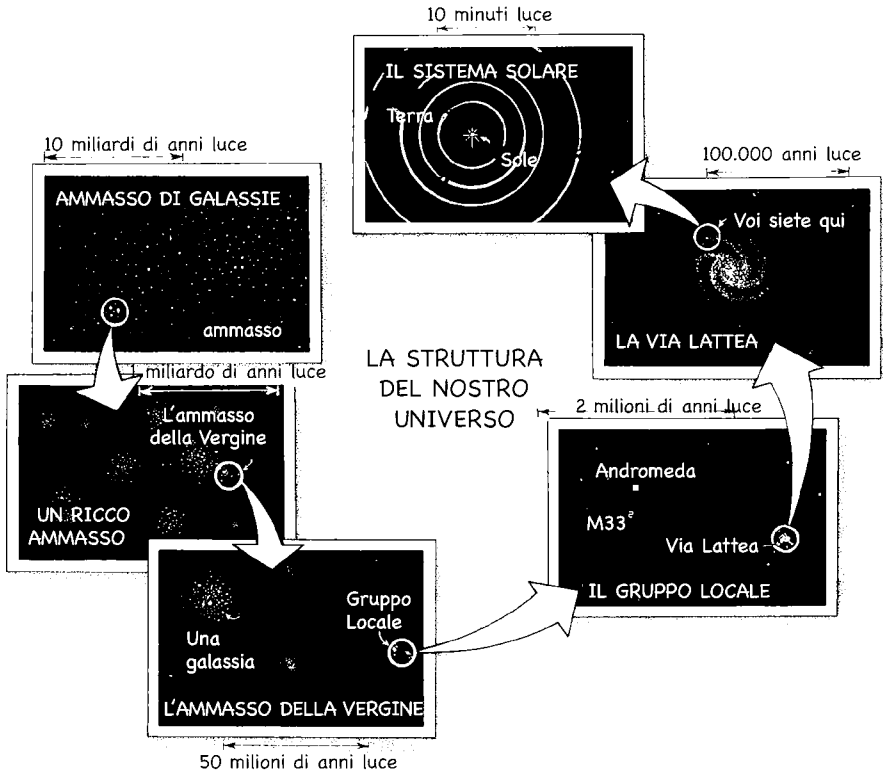
Immaginate di essere J. Robert Oppenheimer. È il 1939, vi siete appena convinti del fatto che le stelle massive quando muoiono devono formare dei buchi neri (capitoli V e VI). Vi sedete insieme a degli astronomi e pianificate di scandagliare il cielo per scoprire se i buchi neri esistono davvero? No, affatto. Se siete Oppenheimer, i vostri interessi risiedono nella fisica fondamentale; potete offrire le vostre idee agli astronomi ma la vostra attenzione è tutta rivolta al nucleo atomico, e allo scoppio della Seconda Guerra Mondiale, che presto vi coinvolgerà nella costruzione della bomba atomica. E quanto agli astronomi, riprendono la vostra idea? No, affatto. Nella comunità degli astronomi regna il conservatorismo, fatta eccezione per quel «rozzo individuo» di Zwicky che propugna la sua idea sulle stelle di neutroni (capitolo V). L'atteggiamento diffuso a livello mondiale che aveva respinto l'esistenza di una massa massima per le nane bianche proposta da Chandrasekhar (capitolo IV) impera ancora.

Immaginate di essere John Archibald Wheeler. È il 1962; cominciate a convincervi, dopo una strenua resistenza, che alcune stelle massive devono creare dei buchi neri quando muoiono (capitoli VI e VII). Vi sedete insieme a degli astronomi e progettate di mettervi a cercarli? No, affatto. Se siete Wheeler, il vostro interesse si incentra sulla focosa unione tra la relatività generale e la meccanica quantistica, un'unione che può avere luogo al centro di un buco nero (capitolo XIII). La verità che predicate ai fisici è che il punto finale dell'implosione di una stella costituisce una grande crisi dalla quale può emergere una nuova e profonda conoscenza. Non esortate gli

astronomi a mettersi in cerca dei buchi neri, e nemmeno delle stelle di neutroni. Non fate parola della ricerca dei buchi neri. Sull'idea più promettente di cercare le stelle di neutroni, nei vostri scritti riecheggia la posizione conservatrice della comunità degli astronomi: «Un simile oggetto avrebbe un diametro dell'ordine di una trentina di chilometri... si raffredderebbe rapidamente... Le speranze di osservare un oggetto così esiguo sono tante quante quelle di vedere un pianeta che appartenga a un'altra stella» (in altre parole, nessuna speranza in assoluto).

Immaginate di essere Yakov Borisovich Zel'dovich. È il 1964; Mikhail Podurets, un membro della vostra vecchia équipe di progettazione della bomba all'idrogeno ha appena completato le simulazioni al computer di un'implosione stellare, compresi gli effetti della pressione, delle onde d'urto, del calore, dell'irradiazione e dell'emissione di massa (capitolo VI). Le simulazioni davano vita a un buco nero (o meglio, a una sua versione computerizzata). Ora siete del tutto convinti che alcune stelle massive, quando muoiono, devono creare dei buchi neri. Adesso vi sedete insieme agli astronomi e progettate di mettervi alla loro ricerca? Sì, in ogni modo. Se siete Zel'dovich avete poca simpatia per l'ossessione di Wheeler per il punto conclusivo dell'implosione stellare. Quel punto sarà occultato dall'orizzonte del buco, sarà invisibile. Invece, l'orizzonte stesso e l'influenza del buco sulle sue vicinanze sì che potrebbero essere osservabili; bisogna solo essere abbastanza intelligenti da capire come. Comprendere la parte osservabile dell'Universo è la vostra ossessione, se siete Zel'dovich; come potreste mai resistere alla sfida di mettervi in cerca dei buchi neri?

Da dove dovrebbe cominciare la vostra ricerca? Chiaramente, dovete cominciare dalla vostra galassia, dalla Via Lattea, il nostro raggruppamento in forma discoidale di 10^{12} stelle. L'altra grande galassia più vicina alla nostra, Andromeda, si trova a una distanza di 2 milioni di anni luce, 20 volte maggiore delle dimensioni della Via Lattea (si veda la figura 8.1). Perciò qualsiasi stella, nube di gas o altro oggetto appartenente ad Andromeda apparirà 20 volte più piccolo e 400 volte più fioco di uno analogo che si trovi nella nostra galassia. Pertanto, se i buchi neri sono difficili da individuare nella Via Lattea, essi saranno 400 volte più ardui da trovare in Andromeda, ed enormemente più difficili ancora da trovare nelle galassie oltre Andromeda che si estendono per circa un miliardo di anni luce.

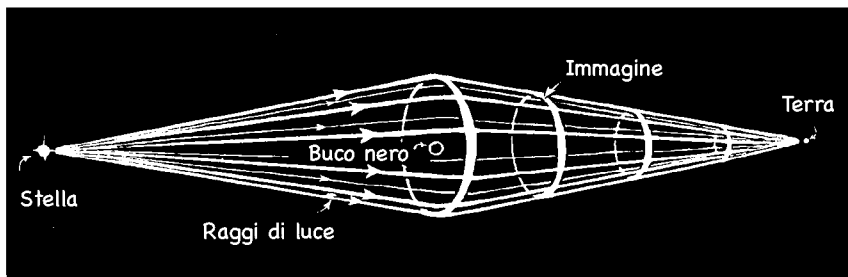
Se cercare nelle vicinanze è così importante perché non cercare nel nostro Sistema Solare, nell'area che si estende dal Sole a Plutone? Potrebbe esservi qui, tra i pianeti, un buco nero rimasto inosservato a causa della sua oscurità?

8.1 – Un quadro sommario della struttura del nostro Universo.

No, chiaramente no. L'attrazione gravitazionale di un buco del genere sarebbe più forte di quella del Sole; sconvolgerebbe completamente le orbite dei pianeti; ma di questo sconvolgimento non c'è traccia. Il buco più vicino, pertanto, deve trovarsi molto al di là dell'orbita di Plutone.

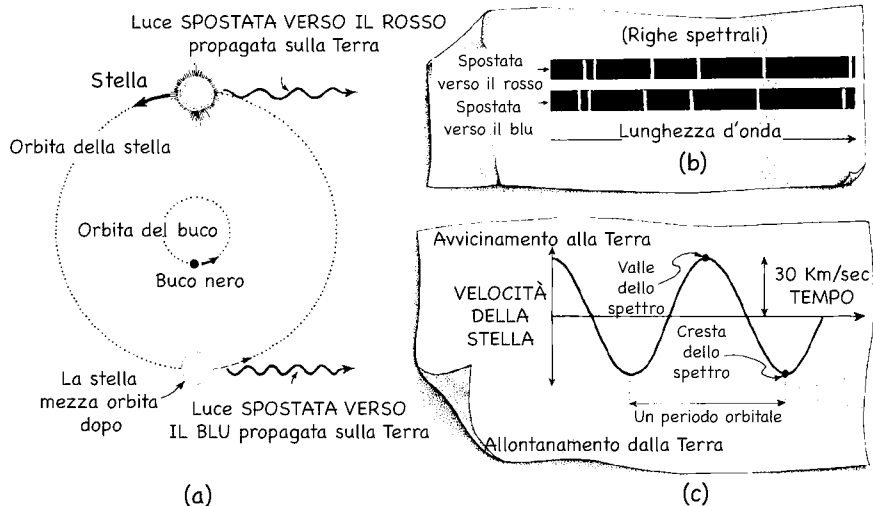
Quanto oltre Plutone? Si può fare una stima approssimativa. Se i buchi neri si formano in seguito alla morte di stelle massive, il buco più prossimo a noi probabilmente non si trova più vicino della stella massiva più vicina, Sirio, a 8 anni luce dalla Terra; e quasi certamente non sarà più vicino della più vicina di tutte le stelle (a parte il Sole), Alpha Centauri, a 4 anni luce di distanza.

Come potrebbe mai, un astronomo, individuare un buco nero a una distanza così grande? Potrebbe limitarsi a scrutare il cielo in cerca di un oggetto scuro semovente che occulta la luce delle stelle alle sue spalle? No, con la sua circonferenza grosso modo pari a 50 chilometri e una distanza pari ad almeno 4 anni luce, il disco oscuro del buco sottende un angolo non più ampio di 10^{-7} arcosecondi. Ciò equivale più o meno allo spessore di un capello umano visto dalla Luna, e 10 milioni di volte più piccolo della risoluzione dei telescopi più potenti del mondo. L'oggetto oscuro semovente sarebbe esile al punto da essere invisibile.

Se non si può vedere il disco del buco nero quando quest'ultimo passa davanti a una stella, si potrebbe vedere la gravità del buco agire come una lente che amplifica la luce della stella (figura 8.2)? Potrebbe la stella apparire fioca all'inizio e poi più brillante mentre il buco si muove tra la Terra e la

8.2 – La gravità di un buco nero dovrebbe agire come una lente e modificare le dimensioni apparenti e la forma di una stella vista dalla Terra. In questa figura, il buco è esattamente allineato tra la stella e la Terra, di modo che i raggi di luce provenienti dalla stella possono raggiungere la Terra con uguale facilità passando al di sopra o al di sotto del buco, attorno alla parte anteriore o a quella posteriore. Tutti i raggi di luce che raggiungono la Terra fuoriescono dalla stella formando un cono divergente; quando superano il buco vengono piegati in basso verso la Terra, e la raggiungono formando un cono convergente. L'immagine della stella che appare nel cielo della Terra è quella di un cerchio sottile. Questo cerchio ha un'area superficiale molto più ampia, e pertanto una brillantezza totale molto maggiore, di quelle che avrebbe se non ci fosse il buco nero. Il cerchio è troppo piccolo per essere individuato da un telescopio, ma la brillantezza totale della stella può essere aumentata di un fattore 10, 100, o ancora superiore.

stella, e poi fioca di nuovo quando il buco si sposta? No, neanche questo metodo di ricerca funzionerebbe. Il motivo dipende dall'ipotesi che la stella e il buco stiano o meno orbitando l'uno intorno all'altra e siano quindi vicini o separati da tipiche distanze interstellari. Se sono vicini, il buco di dimensioni ridotte sarebbe come una lente d'ingrandimento collocata su un davanzale all'ottantanovesimo piano dell'Empire State Building vista da diversi chilometri di distanza. Ovviamente, la piccola lente d'ingrandimento non è in grado di amplificare l'immagine dell'edificio e, analogamente, il buco non esercita alcun effetto sull'aspetto della stella.

Ma se la stella e il buco sono distanti come nella figura 8.2, l'effetto della concentrazione può essere cospicuo e corrispondere a un aumento di dieci, cento o più volte della luminosità della stella. Tuttavia, le distanze interstellari sono così vaste che il necessario allineamento Terra-buco-stella rappresenterebbe un evento di eccezionale rarità, talmente raro che cercarne uno sarebbe un'impresa disperata. Inoltre, anche se fosse possibile osservare un simile effetto-lente, i raggi di luce che dalla stella raggiungono la Terra passerebbero a una tale distanza dal buco (figura 8.2) che una stella intera potrebbe trovarsi al suo posto e agire da lente. Perciò un astronomo sulla Terra non potrebbe sapere se la lente è costituita da un buco nero o da una stella qualsiasi, anche se molto piccola.

Zel'dovich deve aver seguito una concatenazione di pensieri molto simile a questa quando cercava un metodo per osservare i buchi neri. La sua concatenazione portò infine a un metodo che sembrava promettente (figura 8.3): supponiamo che un buco nero e una stella orbitino l'uno intorno all'altra (formando un *sistema binario*). Quando gli astronomi puntano i loro telescopi su questo sistema binario, vedono solo la luce della stella, il buco è invisibile. Tuttavia, la luce della stella testimonierà la presenza del buco: muovendosi attorno a esso nella sua orbita prima viaggerà in direzione della Terra e poi se ne allontanerà. Quando si avvicina a noi l'effetto Doppler dovrebbe spostare la luce della stella verso il blu e, quando essa si allontana, verso il rosso. Gli astronomi possono misurare questi spostamenti con grande precisione poiché la luce della stella, quando viene fatta passare attraverso uno spettrografo (una forma sofisticata di prisma) mostra delle righe spettrali nette e un lieve cambiamento della lunghezza d'onda (colore) emerge chiaramente. Misurando lo spostamento della lunghezza d'onda, gli astronomi possono stabilire la velocità con cui la stella si avvicina alla Terra e tenendo sotto controllo tale spostamento possono stabilire se la velocità della stella muta nel tempo. L'ampiezza di questi cambiamenti può essere di solito

8.3 – Il metodo proposto da Zel'dovich per cercare i buchi neri. (a) Il buco e una stella sono in orbita l'uno intorno all'altra. Se il buco è più pesante della stella la sua orbita sarà più piccola di quella della stella, come indicato (ossia, il buco si muove solo un po' mentre la stella si muove molto). Se il buco fosse più leggero della stella, la sua orbita sarebbe quella più ampia (ossia, la stella si muoverebbe solo un po' mentre il buco si muoverebbe molto). Quando la stella si allontana dalla Terra, come indicato, la sua luce viene spostata verso il rosso (verso una lunghezza d'onda più lunga). (b) La luce che penetra in un telescopio che si trova sulla Terra viene fatta passare attraverso uno spettrografo in modo da creare uno spettro. Qui ne vengono mostrati due: quello in alto, registrato quando la stella si allontana dalla Terra, e quello in basso, registrato mezza orbita dopo, quando la stella si avvicina alla Terra. Le lunghezze d'onda delle nette righe spettrali sono spostate l'una relativamente all'altra. (c) Misurando una sequenza di questi spettri, gli astronomi possono stabilire come cambia nel tempo la velocità della stella quando essa si avvicina e si allontana dalla Terra, e in base a questi cambiamenti di velocità possono stabilire la massa dell'oggetto attorno al quale essa orbita. Se la sua massa è superiore a quella di circa 2 Soli e da esso non proviene luce, allora l'oggetto potrebbe essere un buco nero.

compresa tra i 10 e i 100 chilometri al secondo, e la precisione delle misurazioni è solitamente pari a 0,1 chilometri al secondo.

Cosa si apprende da queste misurazioni ad alta precisione della velocità della stella? Qualcosa sulla massa del buco: più il buco è massivo, più forte è l'attrazione gravitazionale che esercita sulla stella, e quindi più forti devono

essere le forze centrifughe che permettono alla stella di non essere trascinata dentro il buco. Per acquisire delle potenti forze centrifughe la stella deve muoversi velocemente lungo la sua orbita. Perciò un'elevata velocità orbitale si accompagna a una grande massa del buco nero.

Per cercare un buco nero, pertanto, gli astronomi dovrebbero cercare una stella il cui spettro presenti un eloquente spostamento periodico dal rosso al blu, al rosso, al blu. Un simile spostamento è un segno inequivocabile del fatto che la stella ha un compagno di viaggio. Gli astronomi dovrebbero misurare gli spettri della stella per stabilire la velocità con cui orbita attorno al suo compagno, e in base a tale velocità stabilire la massa di quest'ultimo. Se il compagno è molto massivo e da esso non proviene alcuna luce, allora è molto probabile che esso sia un buco nero. Questa era la proposta di Zel'dovich.

Sebbene fosse ampiamente superiore a qualsiasi altro precedente, questo metodo presentava molte insidie; qui mi limiterò a illustrarne due: in primo luogo, stabilire il peso del compagno scuro non è semplice. La velocità misurata della stella non dipende solo dalla massa del suo compagno ma anche dalla massa della stella stessa e dall'inclinazione del piano orbitale del sistema binario rispetto al nostro orizzonte visivo. La massa della stella e l'inclinazione possono essere dedotte in base ad attente osservazioni, ma non è possibile effettuarle con facilità e grande precisione. Di conseguenza, si possono commettere facilmente grossi errori (diciamo di un fattore 2 o 3) nella stima della massa del compagno scuro. In secondo luogo, i buchi neri non sono l'unico tipo di compagni scuri che una stella può avere. Ad esempio, anche una stella di neutroni potrebbe esserlo. Per essere sicuri che il compagno non sia una stella di neutroni bisogna essere convinti che sia molto più pesante del massimo consentito a una stella di neutroni, ossia circa due masse solari. Due stelle di neutroni in orbita stretta l'una intorno all'altra potrebbero a loro volta essere scure e pesare quanto 4 Soli. Il compagno scuro potrebbe essere costituito da un sistema del genere o da due nane bianche fredde in orbita stretta con una massa totale pari a 3 Soli. E vi sono altri tipi di stelle che, pur non essendo del tutto scure possono essere alquanto massive e anormalmente fioche. Bisogna esaminare molto attentamente gli spettri misurati per essere certi che non vi siano segnali della presenza di una seppur minima luce proveniente da queste stelle.

Gli astronomi nei decenni precedenti avevano lavorato duro per osservare e catalogare i sistemi di stelle binari, quindi Zel'dovich non aveva bisogno di effettuare la sua ricerca direttamente nel cielo, poteva utilizzare i cataloghi

degli astronomi. Tuttavia egli non aveva il tempo né la pazienza di passare in rassegna i cataloghi, né disponeva dell'esperienza necessaria per evitare di incappare in errori. Perciò, come era sua abitudine in situazioni simili, egli diresse e gestì il tempo e il talento di altri, in questo caso quelli di Oktay Guseinov, uno studente che aveva completato il dottorato e ne sapeva già molto sulle stelle binarie. Insieme, Guseinov e Zel'dovich trovarono cinque promettenti candidati al ruolo di buco nero tra le molte centinaia di sistemi binari ben documentati presenti nei cataloghi.

Negli anni seguenti gli astronomi prestarono poca attenzione a quei cinque candidati al ruolo di buco nero. Io ero abbastanza irritato dalla mancanza di interesse degli astronomi così, nel 1968, mi assicurai la collaborazione di Virginia Trimble, un'astronoma del Caltech, affinché mi aiutasse a rivedere e ampliare la lista di Zel'dovich e Guseinov. Trimble, sebbene avesse ottenuto il Ph.D. solo da pochi mesi, aveva già acquisito una conoscenza formidabile della scienza astronomica. Conosceva tutti gli errori nei quali avremmo potuto incappare, quelli descritti in precedenza e molti altri, ed era in grado di misurarli con precisione. Esaminando i cataloghi e raccogliendo tutti i dati pubblicati, riuscimmo a individuare le stelle binarie più promettenti e a redigere una nuova lista di otto candidati al ruolo di buco nero. Purtroppo, in tutti e otto i casi, Trimble riuscì a escogitare un modo abbastanza plausibile per spiegare come mai il compagno di viaggio in questione fosse scuro senza perciò dover essere un buco nero. Oggi, un quarto di secolo dopo, nessuno dei nostri candidati è sopravvissuto. Sembra probabile che nessuno di essi sia davvero un buco nero.

Quando lo ha concepito, Zel'dovich sapeva che questo metodo di ricerca delle stelle binarie era un gioco d'azzardo che non garantiva in alcun modo il successo. Fortunatamente, il suo brainstorming sul modo di cercare i buchi neri produsse una seconda idea, un'idea concepita simultaneamente e indipendentemente nel 1964 da Edwin Salpeter, un astrofisico della Cornell University di Ithaca.

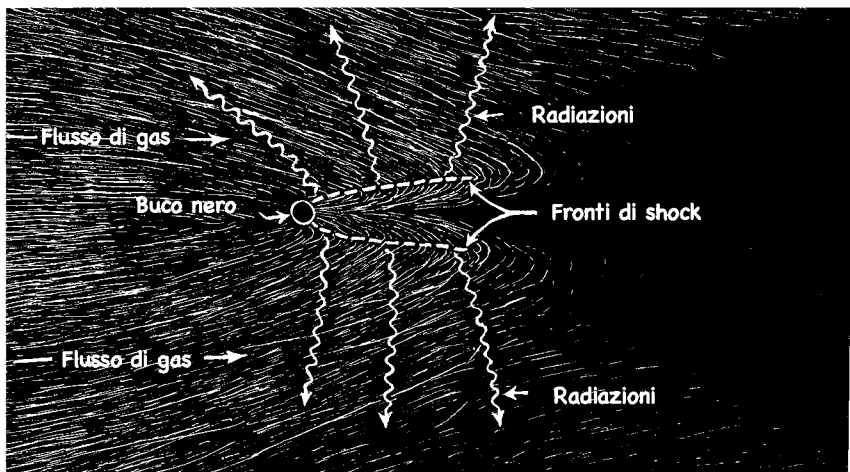
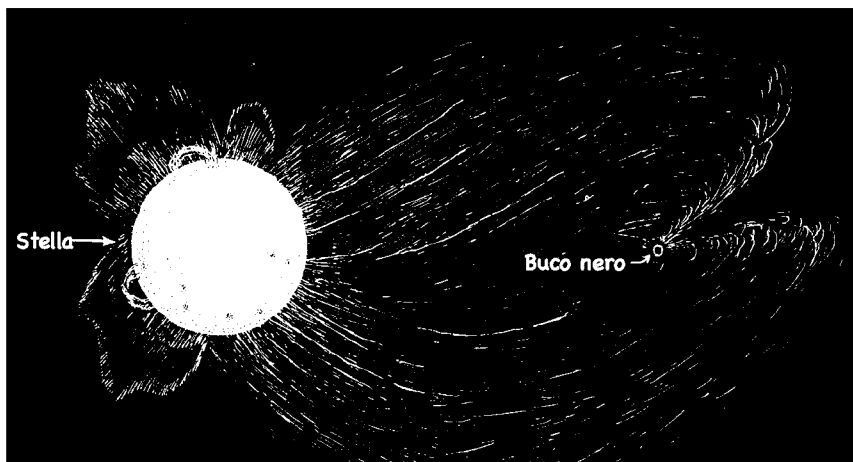
Supponiamo che un buco nero stia attraversando una nube di gas o, analogamente ma dal punto di vista del buco nero, che una nube di gas stia passando nei suoi pressi (figura 8.4). In questo caso, dei flussi di gas, portati a una velocità prossima a quella della luce dalla gravità, si leverebbero intorno ai lati opposti del buco e si scontrerebbero tra loro sul retro di esso. L'urto, sotto forma di un fronte di shock (un improvviso, grande aumento della densità) converte l'immensa energia sprigionata dalla caduta del gas in calo-

re, provocandone una potente irradiazione. In effetti, in questo caso il buco nero funziona come una macchina per convertire parte della massa del gas in caduta in calore e poi in radiazioni. Questa «macchina» potrebbe essere molto efficiente, dedussero Zel'dovich e Salpeter, molto più efficiente, ad esempio, della combustione del combustibile nucleare.

Zel'dovich e la sua équipe rimuginarono su questa idea per due anni, esaminandola da un lato e dall'altro, cercando un modo per renderla più proficua. Tuttavia, essa non era che una delle dozzine di idee sui buchi neri, le stelle di neutroni, le supernovae e l'origine dell'Universo che essi stavano studiando, e ricevette scarsa attenzione. Poi, un giorno del 1966, in un'intensa discussione, Zel'dovich e Novikov si resero conto insieme che potevano combinare l'idea delle stelle binarie con quella sulla ricaduta del gas (figura 8.5).

Dalle superfici di alcune stelle soffiano forti venti di gas (perlopiù idrogeno ed elio; il Sole emette un vento del genere, anche se debole). Supponiamo che un buco nero e una stella che emette dei venti orbitino l'uno intorno all'altra. Il buco catturerà parte del gas del vento, lo riscalderà in un fronte di shock e lo obbligherà a irradiarsi. Sulla lavagna grande un metro quadrato dell'appartamento moscovita di Zel'dovich, questi e Novikov stimarono la temperatura del gas sottoposto a shock: vari milioni di gradi.

Il gas a queste temperature non emette molta luce. Emette invece raggi X.

8.4 – Il metodo Salpeter-Zel'dovich per individuare i buchi neri.

8.5 – La proposta di Zel'dovich e Novikov su come individuare un buco nero. Un vento che soffia dalla superficie di una stella compagna viene catturato dalla gravità del buco. I flussi di gas del vento girano attorno al buco in direzioni opposte e collidono bruscamente in un fronte di shock, dove si riscaldano fino a raggiungere temperature di milioni di gradi ed emettono raggi X. I telescopi ottici dovrebbero vedere la stella orbitare intorno a un compagno scuro e pesante. I telescopi a raggi X dovrebbero vedere i raggi X emessi dal compagno.

Quindi, come compresero Zel'dovich e Novikov, tra quei buchi neri che orbitano attorno a delle stelle compagne, alcuni (anche se non la maggior parte) potrebbero risplendere di raggi X.

Per individuare questi buchi neri, quindi, si potrebbe usare una combinazione di telecopi ottici e telescopi a raggi X. I candidati al ruolo di buchi neri sarebbero sistemi binari in cui un oggetto è una stella luminosa in termini ottici, ma scura per quanto riguarda i raggi X, e l'altro è un oggetto scuro in termini ottici, ma luminoso in termini di raggi X (il buco nero). Dato che anche una stella di neutroni potrebbe catturare il gas di una stella compagna, riscaldarlo in un fronte di shock e produrre raggi X, stabilire il peso dell'oggetto scuro in termini ottici e luminoso in termini di raggi X sarebbe di importanza cruciale. Bisogna essere sicuri che sia più pesante di due Soli e che quindi non sia una stella di neutroni.

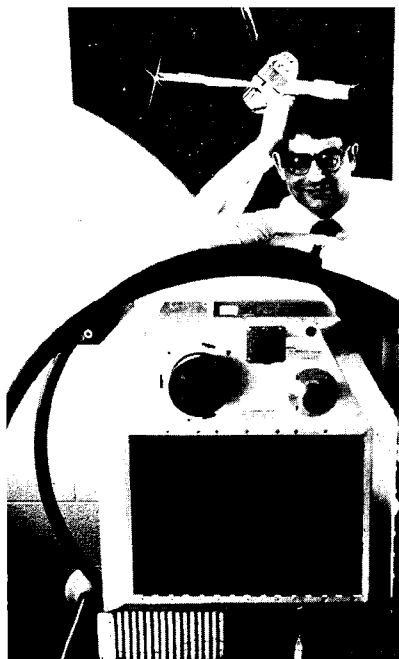
Questa strategia di ricerca presentava un solo problema. Nel 1966 i telescopi a raggi X erano estremamente primitivi.

La ricerca

Il problema con i raggi X, se siete un astronomo, è che non possono penetrare nell'atmosfera terrestre (se siete degli esseri umani ciò rappresenta un vantaggio, perché i raggi X provocano tumori e mutazioni).

Fortunatamente, dei fisici sperimentali lungimiranti, sotto la direzione di Herbert Friedman dell'*U.S. Naval Research Laboratory* (NRL) si adoperavano dagli anni Quaranta per porre le basi dell'astronomia basata sui raggi X attraverso strutture spaziali. Poco dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale, Friedman e i suoi colleghi avevano cominciato a spedire nello spazio strumenti per studiare il Sole sfruttando dei razzi V-2 catturati ai tedeschi. Friedman ha descritto il loro primo volo, avvenuto il 28 giugno 1946, effettuato con un razzo sulla cui punta era collocato uno spettrografo per studiare le radiazioni ultraviolette lontane (i raggi ultravioletti lontani, come i raggi X, non possono penetrare nell'atmosfera terrestre). Dopo essersi librato brevemente al di sopra dell'atmosfera e aver raccolto dati, «il razzo ritornò a Terra, in picchiata con la punta verso il suolo e si seppellì in un cratere di circa 240 metri di diametro e 90 di profondità. Molte settimane di scavi portarono alla luce solo un mucchietto di detriti irriconoscibili; era come se il razzo fosse evaporato nell'impatto».

A partire da questo infelice inizio, l'inventiva, la costanza e il duro lavoro di Friedman e di altri rese a poco a poco possibile utilizzare l'astronomia basata sui raggi X e su quelli ultravioletti. Nel 1949 Friedman e i suoi colleghi piazzavano contatori Geiger su razzi V-2 per studiare i raggi X emessi dal Sole. Alla fine degli anni Cinquanta, quando ormai facevano volare i loro contatori su razzi Aerobee di fabbricazione americana, Friedman e i suoi colleghi studiavano le radiazioni ultraviolette provenienti non solo dal Sole ma anche dalle stelle. I raggi X, tuttavia, erano un altro paio di maniche. Ogni secondo il Sole scaricava un milione di raggi X su un centimetro quadrato del loro contatore Geiger, perciò individuare il Sole basandosi sui raggi X era relativamente facile. Tuttavia, secondo le stime teoriche, le più luminose stelle a raggi X sarebbero state un miliardo di volte più fioche del Sole. Individuare una stella così flebile avrebbe richiesto un rilevatore di raggi X dieci milioni di volte più sensibile di quelli che Friedman spediva in volo nel 1958. Un simile miglioramento era di ordine assai elevato, ma non impossibile.

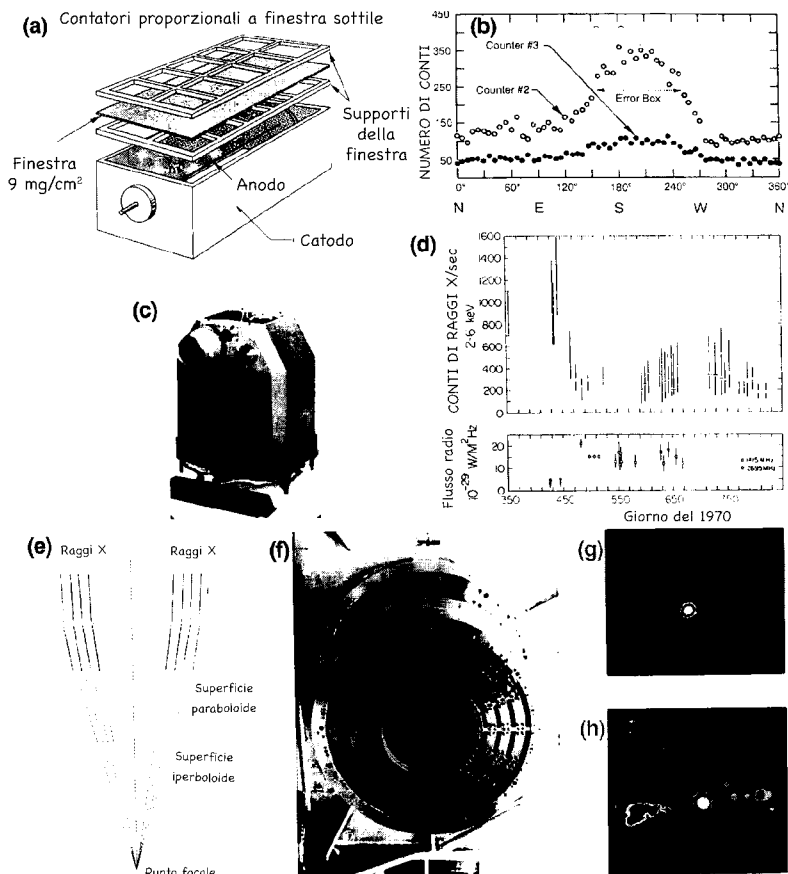
Nel 1962 i rilevatori erano migliorati di diecimila volte. Mancava ancora solo un fattore mille e altre équipe di ricerca, impressionate dai progressi di

A sinistra: Herbert Friedman con il carico di un razzo Aerobee, 1968. *A destra*: Riccardo Giacconi con il rilevatore di raggi X Uhuru, ca 1970 [A sinistra: per gentile concessione dell'U.S. Naval Research Laboratory; a destra: per gentile concessione di R. Giacconi].

Friedman, cominciarono a competere con lui. Una di esse, diretta da Riccardo Giacconi, sarebbe diventata una concorrente formidabile.

In un modo alquanto particolare, Zel'dovich potrebbe aver giocato un ruolo nel successo di Giacconi. Nel 1961 l'Unione Sovietica abrogò inaspettatamente l'accordo che la impegnava insieme agli Stati Uniti a una moratoria di tre anni sui test delle armi nucleari, e sperimentò la bomba più potente mai fatta esplodere dagli esseri umani, una bomba progettata dalle équipe di Zel'dovich e Sakharov nell'Installazione (capitolo VI). Presi dal panico, gli americani prepararono da parte loro nuovi test atomici. Sarebbero stati i primi test americani nell'era delle attrezzature spaziali orbitanti intorno alla Terra. Per la prima volta sarebbe stato possibile misurare dallo spazio i raggi X, i raggi gamma e le particelle ad alta energia emessi da un'esplosione nucleare. Queste misurazioni sarebbero state di importanza cruciale per tenere

sotto controllo in futuro i test delle bombe sovietiche. Effettuare tali misurazioni sulle imminenti serie di test americani richiedeva però un programma d'urgenza. Il compito di organizzarlo e dirigerlo venne affidato a Giacconi, un fisico sperimentale ventottenne della American Science and Engineering (un'impresa privata di Cambridge), che aveva da poco iniziato a progettare e a lanciare rivelatori di raggi X come Friedman. La U.S. Air Force diede a Giacconi tutti i soldi di cui aveva bisogno, ma poco tempo. In meno di un anno egli allargò la sua équipe composta da sei astronomi impegnati nello studio dei raggi X inserendovi altre settanta persone, progettò, costruì e sperimentò tutta una serie di strumenti di monitoraggio delle esplosioni provocate da armamenti e li lanciò con una percentuale di successo del 95% mediante ventiquattro razzi e sei satelliti. Questa esperienza plasmò il nucleo dei membri del suo gruppo facendone un'équipe leale, impegnata e altamente specializzata, idealmente pronta a battere tutti i concorrenti nella creazione dell'astronomia basata sui raggi X.

L'esperta équipe di Giacconi inaugurò la sua attività astronomica con una ricerca sui raggi X della Luna utilizzando un rivelatore modellato su quelli di Friedman e come quelli montati su razzi Aerobee. Il loro razzo lanciato da White Sands, nel New Mexico, a mezzanotte meno un minuto del 18 giugno 1962, raggiunse rapidamente un'altezza di 230 chilometri, poi ricadde sulla Terra. Per 350 secondi rimase abbastanza al di sopra dell'atmosfera terrestre da rilevare i raggi X emessi dalla Luna. I dati telemisurati e trasmessi a Terra erano enigmatici: i raggi X erano molto più forti di quanto ci si aspettasse. A un esame più accurato i dati si rivelarono ancora più sorprendenti. I raggi X sembravano provenire non dalla Luna, ma dalla costellazione dello Scorpione (figura 8.6b). Per due mesi Giacconi e i membri della sua équipe (Herbert Gursky, Frank Paolini e Bruno Rossi) frugarono alla ricerca di errori nei dati e nella strumentazione. Quando non ne trovarono nessuno, annunciarono la loro scoperta: la prima stella a raggi X mai scoperta, *5000 volte più brillante di quanto gli astrofisici teorici avessero previsto.* Dieci mesi più tardi, l'équipe di Friedman confermò la scoperta e la stella venne battezzata Sco X-1 (*1* stava per «la più brillante», *X* per «fonte di raggi X» e *Sco* per «nella costellazione dello Scorpione»).

Come mai i teorici si erano sbagliati? Come avevano potuto sottostimare di un fattore 5.000 la forza dei raggi X cosmici? Essi avevano ipotizzato, erroneamente, che il cielo a raggi X fosse dominato da oggetti già noti nel cielo ottico, oggetti come la Luna, i pianeti e le stelle comuni, che emettono pochi raggi X. Tuttavia, Sco X-1 e altre stelle a raggi X che sarebbero presto

8.6 – La tecnologia e il rendimento in via di perfezionamento degli strumenti per l'astronomia a raggi X, 1962-1978. (a) Disegno schematico del contatore Geiger usato dall'équipe di Giacconi nella scoperta della prima stella a raggi X nel 1962. (b) I dati del contatore Geiger che indicavano che la stella aveva un'ubicazione diversa dalla Luna; si noti la scarsa risoluzione angolare (ampio margine di errore), 90 gradi. (c) Il rilevatore di raggi X Uhuru del 1970. Nell'involucro si trova un contatore Geiger notevolmente perfezionato e davanti al contatore si vede una struttura di stecche alla veneziana per impedire al contatore di rilevare dei raggi X che non ne colpiscano quasi perpendicolarmente la finestra. (d) Misurazione effettuata dall'Uhuru dei raggi X provenienti dal candidato a buco nero Cygnus X-1. (e) Diagramma schematico e (f) fotografia degli specchi che concentrano i raggi X nel telescopio a raggi X Einstein del 1978. (g, h) Fotografie scattate dal telescopio Einstein di due candidati a buchi neri Cygnus X-1 e SS-433 [Disegni e illustrazioni singoli, per gentile concessione di R. Giacconi].

state scoperte erano oggetti di un tipo che nessuno aveva mai visto prima. Erano stelle di neutroni e buchi neri che catturavano gas emessi da normali stelle compagne e li riscaldavano portandoli a temperature elevate nel modo che sarebbe presto stato proposto da Zel'dovich e Novikov (figura 8.5). Dedurre che questa era in effetti la natura delle stelle a raggi X osservate, tuttavia, avrebbe richiesto un altro decennio di duro lavoro in collaborazione da parte di sperimentatori come Friedman e Giacconi e di teorici come Zel'dovich e Novikov.

Il rilevatore di Giacconi del 1962 era estremamente semplice (figura 8.6a): una camera di gas elettrificata con una sottile finestra sulla sommità. Quando un raggio X penetrava nella camera attraverso la finestra spingeva fuori degli elettroni da qualche atomo del gas, e quegli elettroni venivano attirati in un cavo da un campo elettrico dove creavano una corrente elettrica che annunciava l'arrivo del raggio X (queste camere a volte vengono chiamate *contatori Geiger*, altre volte *contatori proporzionali*). Il razzo che trasportava la camera compiva due rotazioni al secondo e la sua punta cambiava rapidamente direzione dirigendosi verso l'alto e poi verso il basso. Questi movimenti permisero alla finestra della camera di perlustrare un'ampia fascia di cielo, puntando prima in una direzione e poi in un'altra. Quando puntò verso la costellazione dello Scorpione, registrò molti segnali a raggi X. Quando puntò altrove, ne registrò pochi. Tuttavia, dato che i raggi X potevano penetrare nella camera da un ampio ventaglio di direzioni, la stima dell'ubicazione di Sco X-1 nel cielo fornita dalla camera era molto incerta. Essa poteva riportare solo un'ubicazione approssimativa e un *campo di errore* circostante dell'ampiezza di novanta gradi che indicava di quanto poteva probabilmente essere sbagliata l'approssimazione (si veda la figura 8.6b).

Per scoprire che Sco X-1 e altre stelle a raggi X che sarebbero state trovate di lì a poco erano in realtà stelle di neutroni e buchi neri inseriti in sistemi binari, sarebbero occorsi campi di errore (incertezze sulla posizione nel cielo) di pochi arcominuti o più piccoli ancora. Si trattava di un ordine molto elevato: un miglioramento di mille volte della precisione angolare.

Il miglioramento necessario, e molto di più, arrivò a poco a poco nel corso dei sedici anni successivi con varie équipe (quella di Friedman, quella di Giacconi e altre ancora) che competevano tra loro a ogni passo lungo questo cammino. A una serie di lanci di razzi da parte dell'una e dell'altra équipe con rilevatori sempre più perfezionati, fece seguito nel dicembre del 1970 il lancio di *Uhuru*, il primo satellite a raggi X (figura 8.6c). Costruito dall'équipe

di Giacconi, Uhuru disponeva di una camera di rilevazione dei raggi X contenente gas cento volte più grande di quella lanciata con il razzo nel 1962. Davanti alla finestra della camera erano state piazzate delle stecche, come una veneziana, per impedire alla stanza di ricevere raggi X da ogni direzione, eccetto pochi gradi intorno alla perpendicolare (figura 8.6d). Uhuru, che scoprì e catalogò 339 stelle a raggi X, fu seguito da diversi altri satelliti simili ma specificamente destinati allo studio dei raggi X, costruiti da scienziati americani, inglesi e tedeschi. Poi nel 1978 l'équipe di Giacconi lanciò un imponente successore di Uhuru: *Einstein*, il primo vero *telescopio* a raggi X del mondo. Poiché i raggi X penetrano attraverso qualsiasi oggetto che essi colpiscano perpendicolarmente, perfino uno specchio, il telescopio Einstein usava una serie di specchi inseriti l'uno nell'altro lungo i quali i raggi X scivolavano come un toboga su un pendio ghiacciato (figure 8.6 e, f). Questi specchi concentravano i raggi X per creare immagini del cielo a raggi X delle dimensioni di un arcosecondo, immagini accurate quanto quelle realizzate dai migliori telescopi ottici del mondo (figure 8.6 g, h).

Dal razzo di Giacconi al telescopio Einstein, in soli sedici anni, dal 1962 al 1978, era stato ottenuto un miglioramento di 300.000 volte nella precisione angolare, e in questo processo la nostra visione dell'Universo era stata rivoluzionata: i raggi X avevano rivelato stelle di neutroni, possibili buchi neri, il gas diffuso incandescente che inonda le galassie quando sono riunite in enormi ammassi, il gas incandescente presente nei resti delle supernovae e nelle corone (atmosfere esterne) di alcuni tipi di stelle, e particelle dotate di energia ultra-elevata nei nuclei di galassie e quasar.

Dei vari possibili buchi neri individuati dai rilevatori di raggi X e dai telescopi a raggi X, Cygnus X-1 (Cyg X-1 per brevità) era uno dei più attendibili. Nel 1974, dopo che esso era assurto al ruolo di probabile candidato, io e Stephen Hawking facemmo una scommessa: lui scommise che non era un buco nero, io che lo era.

Carolee Winstein, che sposai dieci anni dopo la scommessa, era mortificata dalla posta in gioco («Penthouse» per me, in caso di vittoria e «Private Eye» per Stephen, se avesse vinto lui). Altrettanto lo erano le mie sorelle e mia madre. Ma non dovevano preoccuparsi dell'eventualità che potessi vincere l'abbonamento a «Penthouse» (o così credevo negli anni Ottanta); le nostre informazioni sulla natura di Cyg X-1 progredivano solo molto lentamente. Nel 1990, a mio parere, potevamo essere sicuri solo al 95% che fosse un buco nero, ancora non abbastanza per far capitolare Stephen. Evidentemente,

Whereas Stephen Hawking has such a large investment in General Relativity and Black Holes and desires an insurance policy, and whereas Kip Thorne likes to live dangerously without an insurance policy,
Therefore be it resolved that Stephen Hawking bets 1 year's subscription to "Penthouse" as against Kip Thorne's wager of a 4-year Subscription to "Private Eye", that Cygnus X1 does not contain a black hole of mass above the Chandrasekhar limit

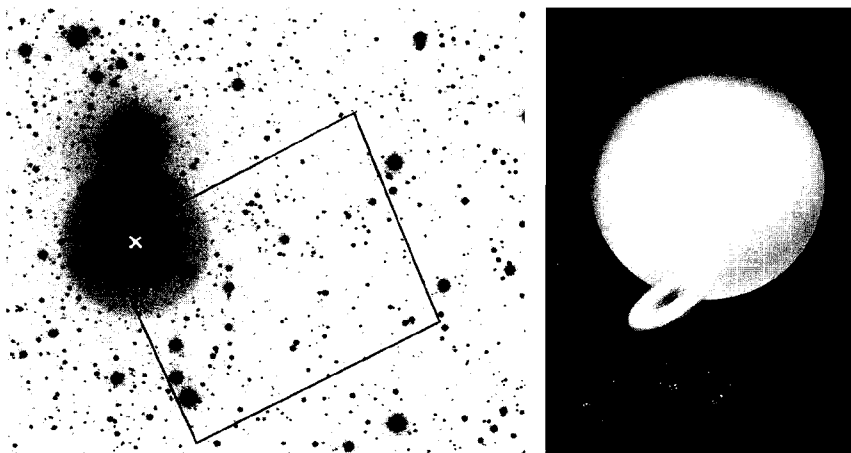
Conceded Stephen Hawking June 1990

Stephen Hawking Kip S. Thorne

Witnessed this tenth day of December 1974

A destra: La scommessa tra me e Stephen Hawking sull'eventualità che Cygnus X-1 fosse un buco nero. *A sinistra*: Hawking durante una conferenza alla University of South California nel giugno 1990, due ore prima di fare irruzione nel mio ufficio e siglare la conclusione della nostra scommessa. [La foto di Hawking è stata gentilmente concessa da Irene Fertik, University of South California].

Stephen leggeva le prove in modo diverso. Un giorno di giugno del 1990, a tarda notte, mentre ero a Mosca per lavorare a una ricerca insieme ai colleghi sovietici, Stephen, con un gruppo di membri della famiglia, infermiere e amici, fece irruzione nel mio ufficio al Caltech, trovò la scommessa incorniciata, scrisse una nota in cui egli ammetteva la sconfitta e la convalidò con la sua impronta digitale.

La prova che Cyg X-1 contiene un buco nero è proprio del tipo ipotizzato da Zel'dovich e Novikov quando avevano proposto il loro metodo di ricerca: Cyg X-1 è un sistema binario costituito da una stella luminosa, ma scura in termini di raggi X, che orbita intorno a un compagno luminoso in termini di raggi X, ma scuro dal punto di vista ottico; il compagno era stato pesato per assicurarsi che fosse troppo pesante per essere una stella di neutroni, e pertanto era probabilmente un buco nero.

8.7 – *A sinistra*: Negativo di una fotografia fatta con il telescopio ottico di cinque metri di Monte Palomar da Jerome Kristian nel 1971. Il rettangolo nero delimita il campo di errore in cui secondo i dati di Uhuru del 1971 si troverebbe Cygnus X-1. La x bianca indica l'ubicazione di un segnale radio, misurato da radiotelescopi, che coincideva con un cambiamento improvviso nei raggi X provenienti da Cyg X-1. La x coincide con la stella ottica HDE 226868 e quindi la identifica come compagna binaria di Cyg X-1. Nel 1978 il telescopio a raggi X Einstein ha confermato questa identificazione; si veda la figura 8.6g. *A destra*: Raffigurazione artistica di Cyg X-1 e HDE 226868, basata su tutti i dati ottici e relativi ai raggi X. [A sinistra: per gentile concessione del Dr. Jerome Kristian, Carnegie Observatories; a destra: dipinto di Victor J. Kelley, per gentile concessione della National Geographic Society].

La prova che questa sia la natura di Cyg X-1 non è stata facile da trovare. Essa ha richiesto uno sforzo massiccio e in collaborazione effettuato durante gli anni Sessanta e Settanta da centinaia di fisici sperimentali, di astrofisici teorici e di astronomi osservativi.

I fisici sperimentali erano persone come Herbert Friedman, Stuart Bowyer, Edward Byram e Talbot Chubb, che scoprirono Cyg X-1 nel volo di un razzo nel 1964; Harvey Tananbaum, Edwin Kellog, Herbert Gursky, Stephen Murray, Ethan Schrier e Riccardo Giacconi che usarono Uhuru nel 1971 per individuare la posizione di Cyg X-1 con un campo di errore di due arcominuti (figura 8.7), e molti altri che hanno scoperto e studiato le violente, caotiche

fluttuazioni dei raggi X e le loro energie, fluttuazioni che sono ciò che ci si aspetta da dei gas turbolenti e incandescenti attorno a un buco nero.

Gli astronomi osservativi che hanno contribuito a questo sforzo mondiale erano persone come Robert Hjellming, Cam Wade, Luc Braes e George Miley, che nel 1971 hanno scoperto un'emissione di onde radio all'interno del campo di errore di Cyg X-1 simultanea a un enorme cambiamento nei raggi X emessi da Cyg X-1 misurato da Uhuru, precisando in tal modo l'ubicazione di Cyg X-1 entro un arcosecondo (figure 8.6 d e 8.7); Louise Webster, Paul Murdin e Charles Bolton che con dei telescopi ottici hanno scoperto che una stella ottica, HDE 226868, nel luogo di ubicazione del segnale radio, orbita intorno a un compagno massiccio, scuro in termini ottici ma luminoso in termini di raggi X (Cyg X-1); e circa un centinaio di altri astronomi ottici che hanno effettuato approfondite misurazioni di HDE 226868 e di altre stelle nelle sue vicinanze, misurazioni fondamentali per evitare gravi errori nella stima della massa di Cyg X-1.

Tra gli astrofisici che hanno contribuito allo sforzo figuravano persone come Zel'dovich e Novikov, che avevano proposto il metodo di ricerca; Bohdan Paczynski, Yoram Avni e John Bahcall, che hanno elaborato modi complessi ma affidabili per evitare di incappare in errori quando si stimano le masse; Geoffrey Burbidge e Kevin Prendergast, che hanno capito che il gas incandescente che emette raggi X doveva formare un disco intorno al buco; e Nikolai Shakura, Rashid Sunyaev, James Pringle, Martin Rees, Jerry Ostriker e molti altri che hanno elaborato modelli teorici dettagliati del gas che emette raggi X e del suo disco da mettere a confronto con le osservazioni dei raggi X.

Nel 1974 questo sforzo massiccio aveva prodotto, con un'affidabilità pari all'incirca all'80%, l'immagine di Cyg X-1 e della sua stella compagna HDE 226868, raffigurata da un artista e riportata nella parte destra della figura 8.7. Era proprio il tipo di immagine che avevano previsto Zel'dovich e Novikov, ma molto più dettagliata: il buco nero al centro di Cyg X-1 ha una massa certamente più grande di 3 e probabilmente di 7 Soli, e molto verosimilmente pari a 16 Soli; la sua compagna HDE 226868, luminosa in termini ottici ma scura in termini di raggi X, ha una massa probabilmente superiore a quella di 20 Soli e molto verosimilmente pari a circa 33 Soli, e ha un raggio grosso modo 20 volte più grande di quello del Sole; la distanza tra la superficie della stella e il buco è di circa 20 volte il raggio del Sole (14 milioni di chilometri); e il sistema binario si trova a circa 6.000 anni luce dalla Terra. Cyg X-1 è il secondo oggetto a raggi X più brillante nel cielo; HDE 226868, molto bril-

lante in confronto alla maggior parte delle stelle osservate da un grande telescopio, è tuttavia troppo fioca per essere vista a occhio nudo.

Nei due decenni trascorsi dal 1974, la nostra fiducia in questa immagine di Cyg X-1 è aumentata da più o meno l'80% al 95% (sono mie stime personali). La nostra fiducia non è del 100% perché, malgrado gli enormi sforzi, non sono ancora stati trovati segnali inequivocabili della presenza di un buco nero in Cyg X-1. Nessun segnale luminoso o a raggi X grida agli astronomi in modo incontrovertibile «io provengo da un buco nero». È ancora possibile escogitare spiegazioni diverse da quelle del buco nero per tutte le osservazioni effettuate, anche se tali spiegazioni sono così contorte che pochi astronomi le prendono sul serio.

Invece, alcune stelle di neutroni chiamate pulsar annunciano in modo inequivocabile «io sono una stella di neutroni»: i loro raggi X o in certi casi le loro onde radio, giungono sotto forma di chiare pulsazioni regolate con precisione. La cadenza temporale in certi casi è precisa quanto il ticchettio dei nostri migliori orologi atomici. Queste pulsazioni posso essere interpretate *unicamente* come il prodotto di fasci di radiazioni emessi dalla superficie di una stella di neutroni che passano accanto alla Terra quando la stella ruota, come il segnale luminoso rotante di un aeroporto o di un faro. Perché questa è la sola spiegazione possibile? Una scansione temporale così precisa può derivare solo dalla rotazione di un oggetto massivo, dotato di inerzia dovuta alla sua massa e quindi di resistenza inerziale alle forze erratiche che renderebbero erratica anche la sequenza temporale di queste manifestazioni; di tutti gli oggetti massivi mai concepiti dalla mente degli astrofisici solo le stelle di neutroni e i buchi neri possono ruotare alle enormi velocità (centinaia di rotazioni al secondo) di alcune pulsar; e solo le stelle di neutroni, non i buchi neri, possono emettere fasci rotanti, perché i buchi neri non possono avere «peli» (qualsiasi fonte di un simile fascio, associata all'orizzonte del buco, costituirebbe un esempio del tipo di «peli» che un buco nero non può avere[1]).

Gli astronomi hanno cercato inutilmente per vent'anni un segnale inequivocabile, analogo alle pulsazioni delle pulsar, della presenza di un buco nero in Cyg X-1. Un esempio di un simile segno (suggerito nel 1972 da Rashid Sunyaev, membro dell'équipe di Zel'dovich) sono le pulsazioni tipo pulsar delle radiazioni prodotte da un fascio oscillante originato da un grumo coeso di gas che orbita intorno al buco. Se questa massa si trovasse vicina al buco e resistesse per molte orbite prima di cominciare a sprofondare nell'orizzonte, i particolari del graduale cambiamento dell'intervallo tra le sue pulsazioni potrebbero fornire un segnale chiaro e non ambiguo del tipo «io sono un buco

nero». Purtroppo, questo segnale non è mai stato rilevato. Le ragioni sembrano essere diverse: (1) il gas incandescente che emette raggi X si muove intorno al buco nero in modo così turbolento e caotico che dei grumi coesi possono resistere alla disgregazione solo per una o poche orbite, non per molte; (2) se qualche grumo riesce a resistere e a produrre un segnale della presenza di un buco nero, i turbolenti raggi X emessi dal resto del gas turbolento evidentemente lo soffocheranno; (3) se Cyg X-1 è effettivamente un buco nero, le simulazioni matematiche indicano che la maggior parte dei raggi X proviene da aree molto al di fuori del suo orizzonte, da circonferenze grosso modo dieci volte quella critica, o più, dove vi è un volume molto più grande dal quale i raggi X possono essere emessi che non vicino all'orizzonte. A distanze così grandi dal buco, le previsioni gravitazionali della relatività generale e della teoria newtoniana della gravità sono approssimativamente le stesse, perciò se dai grumi di gas orbitanti provenissero delle pulsazioni, queste non fornirebbero un segnale inequivocabile della presenza di un buco nero.

Per ragioni analoghe a queste, gli astronomi potrebbero non trovare mai alcun tipo di segnale definitivo della presenza di un buco nero in nessun tipo di onda elettromagnetica emessa nelle vicinanze di un buco nero. Fortunatamente, vi sono eccellenti prospettive per quanto riguarda un segnale completamente diverso trasportato dalle radiazioni gravitazionali. Torneremo su questo aspetto nel capitolo X.

L'età dell'oro della ricerca teorica sui buchi neri (capitolo VII) è coincisa con la ricerca osservativa in questo campo e con la scoperta di Cyg X-1 e la decifrazione della sua natura. Quindi ci si aspetterebbe che i giovani che avevano dominato l'età dell'oro (Penrose, Hawking, Novikov, Carter, Israel, Price, Teukolsky, Press e altri) abbiano svolto un ruolo centrale nella ricerca sui buchi neri. Ma non è stato così, a eccezione di Novikov. Il talento e le conoscenze che quei giovani avevano sviluppato, e le notevoli scoperte che andavano facendo sulla rotazione, la pulsazione e la mancanza di peli dei buchi neri, erano irrilevanti per la ricerca e la decifrazione di Cyg X-1. Avrebbe potuto essere diverso se vi fosse stato un segnale inequivocabile del fatto che Cyg X-1 è un buco nero. Ma non ne è stato rilevato nessuno.

Quei giovani, e altri fisici teorici come loro, vengono a volte chiamati *relativisti*, perché passano gran parte del loro tempo a esplorare le leggi della relatività generale. I teorici che invece *hanno* contribuito alla ricerca (Zel'dovich Paczynski, Sunyaev, Rees e altri) erano di una razza assai diversa, detta degli *astrofisici*. Per questa ricerca gli astrofisici dovevano padroneggiare

solo una quantità ridotta di relatività generale, quanto bastava per essere convinti che la curvatura dello spaziotempo fosse abbastanza irrilevante, e che una descrizione newtoniana della gravità sarebbe stata sufficiente per costruire il modello di un oggetto come Cyg X-1. Tuttavia, essi avevano bisogno di un'enorme quantità di altre conoscenze, conoscenze che fanno parte della comune cassetta degli attrezzi degli astrofisici. Dovevano padroneggiare un vasto patrimonio di conoscenze astronomiche riguardanti i sistemi di stelle binarie, le strutture e gli spettri delle stelle compagne di possibili buchi neri e lo spostamento verso il rosso della luce stellare da parte della polvere interstellare, uno strumento fondamentale per stabilire la distanza di Cyg X-1. Essi dovevano anche essere esperti di aspetti come i flussi di gas ad alte temperature, le onde d'urto formate dalla collisione di flussi di gas, la turbolenza del gas, le forze d'attrito presenti nei gas provocate dalla turbolenza e da campi magnetici caotici, la rottura violenta e la ricomposizione delle linee del campo magnetico, la formazione di raggi X nei gas ad alte temperature, la propagazione dei raggi X attraverso il gas e molti altri ancora. Pochi individui potevano padroneggiare tutto questo e al tempo stesso la complicata matematica dello spaziotempo curvo. I limiti umani costrinsero la comunità dei ricercatori a dividersi. O ci si specializzava nella fisica teorica dei buchi neri, deducendo dalla relatività generale le proprietà che essi dovrebbero avere, o ci si specializzava nell'astrofisica dei sistemi binari, del gas ad alte temperature che cade nei buchi neri e nelle radiazioni prodotte da tale gas. Si era *relativisti* o *astrofisici*.

Alcuni di noi cercarono di essere entrambi, ottenendo solo modesti successi. Zel'dovich, il consumato astrofisico, ebbe occasionalmente nuove intuizioni sulle caratteristiche fondamentali dei buchi neri. Io, in quanto relativista di un certo talento, cercai di costruire modelli relativistici generali dei gas che fluiscono in prossimità del buco nero dentro Cyg X-1. Ma Zel'dovich non comprendeva a fondo la relatività, e io non comprendevo alla perfezione la scienza astronomica. Le barriere da superare erano enormi. Di tutti i ricercatori che ho conosciuto nell'età dell'oro, solo Novikov e Chandrasekhar avevano un piede saldamente piantato nell'astrofisica e l'altro nella relatività.

I fisici sperimentali come Giacconi, che progettavano e lanciavano rilevatori e satelliti a raggi X, dovevano affrontare una barriera simile. Ma c'era una differenza. I relativisti non erano necessari nella ricerca dei buchi neri, mentre i fisici sperimentali erano essenziali. Gli astronomi osservativi e gli astrofisici, con la loro padronanza degli strumenti necessari alla comprensione dei sistemi binari, dei flussi di gas e della propagazione dei raggi X, non erano in gra-

do di fare nulla finché i fisici sperimentali non fornivano loro dati dettagliati sui raggi X. I fisici sperimentali spesso cercarono di decifrare cosa dicevano i loro dati sul flusso del gas e l'eventuale buco nero che lo produceva, prima di passarli agli astronomi e agli astrofisici, ma con risultati solo modesti. Gli astronomi e gli astrofisici li ringraziavano molto gentilmente, prendevano i dati e li interpretavano nel loro modo, più sofisticato e affidabile.

La dipendenza degli astronomi e degli astrofisici dai fisici sperimentali è solo una delle interdipendenze cruciali per il successo nella ricerca dei buchi neri. Il successo, infatti, era il risultato degli sforzi comuni e mutuamente interdipendenti di sei diverse comunità di individui, ognuna delle quali svolgeva un ruolo fondamentale. I *relativisti* hanno dedotto, in base alle leggi della relatività generale, che i buchi neri devono esistere. Gli *astrofisici* hanno proposto il metodo di ricerca e fornito una guida cruciale in diverse fasi di quel cammino. Gli *astronomi osservativi* hanno individuato HDE 226868, la compagna di Cyg X-1; hanno utilizzato le righe spettrali spostate periodicamente di frequenza provenienti da essa per stabilire il peso di Cyg X-1, e hanno effettuato estese osservazioni per confermare le loro stime del suo peso. I *fisici sperimentali* hanno creato gli strumenti e le tecniche che hanno reso possibile la ricerca delle stelle a raggi X e hanno realizzato la ricerca che ha individuato Cyg X-1. Gli *ingegneri e i manager* della NASA hanno creato i razzi e i veicoli spaziali che hanno trasportato i rilevatori di raggi X nell'orbita terrestre. E, non meno importanti, i *contribuenti americani* hanno fornito i fondi, diverse centinaia di milioni di dollari, necessari per i razzi, i velivoli spaziali, i rilevatori di raggi X, i telescopi a raggi X e gli stipendi degli ingegneri, dei manager e degli scienziati che hanno lavorato con essi.

Grazie a questo notevole lavoro di squadra, oggi, negli anni Novanta, siamo sicuri quasi al 100% che i buchi neri esistono non solo all'interno di Cyg X-1, ma anche in diversi altri sistemi binari della nostra galassia.

IX. SERENDIPITY

Dove gli astronomi sono costretti a concludere che, senza che sia stato previsto, nei nuclei delle galassie (probabilmente) risiedono buchi neri un milione di volte più pesanti del Sole

Radiogalassie

Se nel 1962 (quando i fisici teorici stavano appena cominciando ad accettare il concetto di buco nero) qualcuno avesse affermato che l'Universo contiene buchi neri giganti milioni o miliardi di volte più pesanti del Sole, gli astronomi si sarebbero messi a ridere. Ciononostante, gli astronomi, senza saperlo, avevano osservato quei giganteschi buchi fin dal 1939 utilizzando le onde radio. O perlomeno ne abbiamo oggi il forte sospetto.

Le onde radio sono l'estremo opposto dei raggi X. I raggi X sono onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda estremamente corta, di solito 10.000 volte *più corte* della lunghezza d'onda della luce (figura 2 del Prologo). Anche le onde radio sono onde elettromagnetiche, ma hanno lunghezze d'onda lunghe, che presentano di solito una distanza di qualche metro tra la cresta e la valle dell'onda, ossia un milione di volte più lunghe di quella della luce. I raggi X e le onde radio sono opposti anche in termini di dualismo onda/particella (scheda 4.1), la propensione delle onde elettromagnetiche a comportarsi a volte come un'onda e a volte come una particella (un fotone). I raggi X, tipicamente, si comportano come particelle ad alta energia (fotoni) e quindi sono più facili da individuare con contatori Geiger in cui i fotoni raggi X colpiscono degli atomi espellendone gli elettroni (capitolo VIII). Le onde radio quasi sempre si comportano come onde di forze elettriche e magnetiche, e quindi sono più facili da individuare con cavi o antenne di metallo in cui la forza elettrica oscillante delle onde spinge gli elettroni su e giù, creando in tal modo segnali oscillanti in un radioricevitore collegato all'antenna.

Le onde radio cosmiche (onde radio provenienti dall'esterno della Terra)

sono state scoperte per un caso fortuito nel 1932 da Karl Jansky, un ingegnere radio dei Bell Telephone Laboratories di Holmdel, nel New Jersey. Appena uscito dal college, a Jansky era stato assegnato il compito di individuare il rumore che funestava le telefonate verso l'Europa. In quei giorni, le telefonate venivano trasmesse oltre Atlantico via radio, così Jansky costruì una speciale antenna radio, composta da una lunga schiera di tubi di metallo, per cercare la fonte del rumore statico (figura 9.1a). Egli scoprì che la maggior parte del rumore statico era provocata dai temporali, ma che una volta che essi erano cessati, restava un sibilo appena percettibile. Nel 1935 egli aveva individuato la fonte di questo sibilo: esso proveniva perlopiù dalle regioni centrali della Via Lattea. Quando le regioni centrali erano sopra di noi, il sibilo era forte; quando scendevano oltre l'orizzonte, il sibilo diminuiva, ma non spariva del tutto.

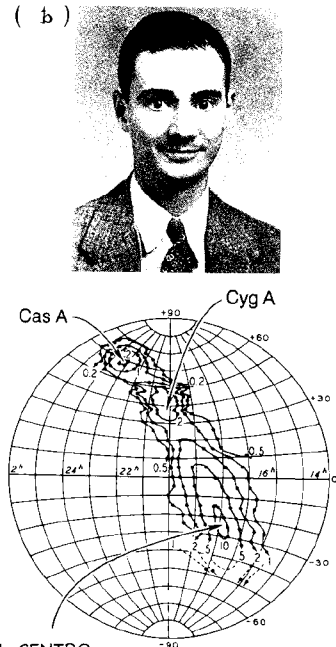
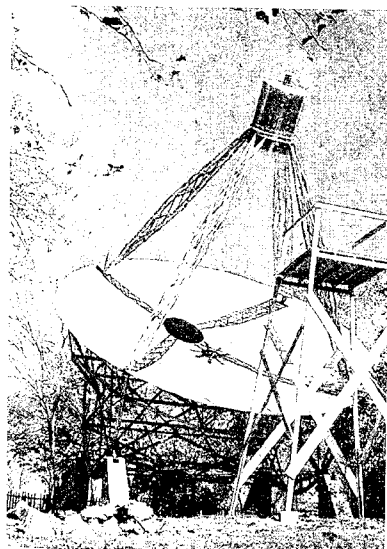
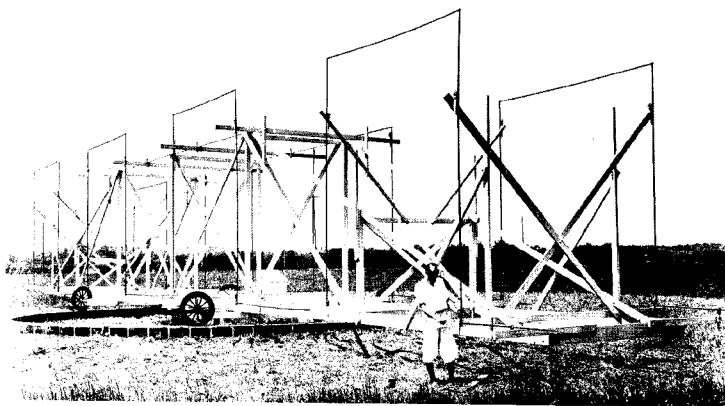
Era una scoperta sorprendente. Chiunque avesse mai pensato a delle onde radio cosmiche si sarebbe aspettato che il Sole fosse la fonte più intensa di onde radio nel cielo, così come era la fonte di luce più brillante. Dopotutto, il Sole è un miliardo (10^9) di volte più vicino a noi della maggior parte delle stelle della nostra galassia, per cui le sue onde radio dovrebbero essere grosso modo $10^9 \times 10^9 = 10^{18}$ volte più intense di quelle provenienti da altre stelle. Dato che nella nostra galassia sono presenti solo 10^{12} stelle, il Sole dovrebbe emettere onde radio più intensamente di tutte le altre messe assieme di un fattore più o meno pari a $10^{18}/10^{12} = 10^6$ (un milione). Come poteva essere sbagliato questo ragionamento? Come era possibile che le onde radio provenienti dalle distanti regioni centrali della Via Lattea fossero tanto più intense di quelle del vicino Sole?

Per quanto questo mistero possa essere sorprendente, lo è molto di più, a posteriori, che gli astronomi non vi abbiano prestato quasi alcuna attenzione. Infatti, malgrado l'ampia pubblicità data al fenomeno dalla Bell Telephone Company, solo due astronomi sembrano essersi interessati alla scoperta di Jansky. Essa era condannata quasi all'oblio dallo stesso conservatorismo della comunità degli astronomi che aveva incontrato l'affermazione di Chandrasekhar secondo cui nessuna nana bianca poteva essere più pesante di 1,4 Soli (capitolo IV).

Le due eccezioni a questa generale mancanza di interesse erano un dottorando, Jesse Greenstein, e un assistente universitario, Fred Whipple, del Dipartimento di astronomia dell'Università di Harvard. Greenstein e Whipple, riflettendo sulla scoperta di Jansky, dimostrarono che se le idee allora prevalenti sul modo in cui le onde radio venivano generate erano corrette, era im-

possibile che la nostra galassia producesse onde radio forti come quelle osservate da Jansky. Malgrado questa apparente impossibilità, Greenstein e Whipple credevano alle osservazioni di Jansky; erano sicuri che il problema fosse la teoria astrofisica, e non Jansky. Ma senza indicazioni sui punti in cui la teoria era errata e poiché, come ricorda Greenstein, «non incontrai mai nessun altro [negli anni Trenta] che avesse il minimo interesse per questo argomento, non un solo astronomo», essi rivolsero altrove la loro attenzione.

Nel 1935 (all'incirca l'epoca in cui Zwicky stava inventando il concetto di stella di neutroni; capitolo V), Jansky aveva imparato sul sibilo galattico tutto quello che la sua primitiva antenna gli potesse permettere di scoprire. Nell'intento di arrivare a una maggiore conoscenza, egli propose ai Bell Telephone Laboratories la costruzione del primo vero radiotelescopio del mondo: un'enorme scodella di metallo di 30 metri di diametro da cui le onde radio in arrivo sarebbero state riflesse verso un'antenna e un ricevitore in modo analogo a quello con cui un telescopio ottico riflette la luce dal suo specchio verso un oculare o una lastra fotografica. La burocrazia della Bell respinse il progetto, non dava adito ad alcun profitto. Jansky, da bravo dipendente, ubbidì. Abbandonò lo studio del cielo e con la Seconda Guerra Mondiale ormai imminente, rivolse i suoi sforzi alle comunicazioni radio sulle onde corte.

Gli scienziati professionisti erano talmente poco interessati alla scoperta di Jansky che l'unico a costruire un radiotelescopio durante il successivo decennio fu Grote Reber, un eccentrico laureato e radioamatore di Wheaton, nell'Illinois, sigla W9GFZ. Avendo letto del sibilo radio di Jansky sulla rivista «Popular Astronomy», Reber si mise a studiarlo nei dettagli. Reber aveva un livello di istruzione molto basso in campo scientifico, ma ciò non era importante. Quel che importava era la sua buona preparazione in campo ingegneristico e la sua forte vena pratica. Con la sua enorme ingenuità e i suoi modesti risparmi, egli progettò e costruì con le sue mani nel giardino di sua madre il primo radiotelescopio del mondo, un disco del diametro di 9 metri (figura 9.1c), e con esso tracciò delle mappe radio del cielo (figura 9.1d). In queste mappe si vede chiaramente non solo la regione centrale della Via Lattea ma anche altre due radiosorgenti, in seguito battezzate Cyg A e Cas A, dove *A* sta per «radiosorgente più intensa», *Cyg* e *Cas* per «nelle costellazioni del Cigno e di Cassiopea». Quattro decenni di indagini avrebbero infine dimostrato, con un'elevata probabilità, che Cyg A e molte altre radiosorgenti scoperte negli anni successivi sono alimentate da buchi neri giganti.

9.1 – (a) Karl Jansky e l'antenna con cui nel 1932 scoprì le onde radio cosmiche provenienti dalla nostra galassia. (b) Grote Reber, ca. 1940. (c) Il primo radiotelescopio del mondo, costruito da Reber nel giardino della madre a Wheaton, nell'Illinois. (d) Una mappa delle onde radio provenienti dal cielo tracciata da Reber con il suo radiotelescopio artigianale [(a) Fotografia dei Bell Telephone Laboratories, per gentile concessione dell'AIP Emilio Segrè Visual Archives; (b) e (c) per gentile concessione di Grote Reber; (d) Adattamento da Reber (1944)].

La storia di questo lavoro di indagine costituirà il filo principale di questo capitolo. Ho scelto di dedicare un intero capitolo a questa storia per diverse ragioni.

Primo, questa storia illustra una modalità di scoperta astronomica abbastanza diversa da quelle descritte nel capitolo VIII, in cui Zel'dovich e Novikov proposero un metodo concreto per cercare i buchi neri; i fisici sperimentali, gli astronomi e gli astrofisici lo applicarono, ed esso diede i suoi risultati. In questo capitolo, dei buchi neri giganti vengono già osservati da Reber nel 1939, molto prima che qualcuno avesse mai pensato di mettersi a cercarli, ma ci vorranno quarant'anni di prove osservative sempre più numerose per costringere gli astronomi ad ammettere che ciò che stanno osservando sono dei buchi neri.

Secondo, il capitolo VIII illustrava l'abilità e le capacità degli astrofisici e dei relativisti; il presente capitolo mostra i loro limiti. L'esistenza dei tipi di buchi neri scoperti nel capitolo VIII era stata prevista un quarto di secolo prima che qualcuno si mettesse a cercarli. Erano i buchi di Oppenheimer e Snyder: poche volte più pesanti del Sole e creati dall'implosione di stelle pesanti. L'esistenza dei buchi neri giganti di questo capitolo, invece, non era mai stata prevista da nessun teorico. Essi sono migliaia o milioni di volte più pesanti di qualsiasi stella che gli astronomi abbiano mai visto in cielo, e quindi non possono verosimilmente essere stati creati dall'implosione di stelle come quelle. Qualsiasi teorico che avesse preannunciato l'esistenza di questi buchi neri giganti avrebbe macchiato la propria reputazione scientifica. La loro scoperta rappresenta una circostanza fortuita nella sua forma più pura.

Terzo, la storia delle scoperte presentate in questo capitolo illustrerà ancor più chiaramente del capitolo VIII le complesse interazioni e interdipendenze esistenti tra quattro comunità di scienziati: relativisti, astrofisici, astronomi e fisici sperimentali.

Quarto, alla fine del capitolo risulterà che la rotazione e l'energia rotazionale dei buchi neri giganti svolgono un ruolo centrale nella spiegazione delle onde radio osservate. Invece, la rotazione del buco non rivestiva alcuna importanza per le proprietà osservate nei buchi neri di modeste dimensioni del capitolo VIII.

Nel 1940, dopo aver effettuato le sue prime radioesplorazioni del cielo, Reber redasse con cura una descrizione tecnica del suo telescopio, delle sue misurazioni e della sua mappa e la spedì a Subrahmanyan Chandrasekhar, allora redattore dell'«Astrophysical Journal» presso l'Osservatorio Yerkes

dell'Università di Chicago, in riva al lago Geneva, nel Winsconsin. Chandrasekhar fece circolare il notevole manoscritto di Reber tra gli astronomi dello Yerkes. Perplessi di fronte al manoscritto e scettici verso quel dilettante completamente sconosciuto, diversi astronomi si recarono a Wheaton, nell'Illinois, per vedere il suo strumento. Restarono impressionati. Chandrasekhar pubblicò l'articolo.

Jesse Greenstein, che dopo il dottorato a Harvard era diventato astronomo allo Yerkes, si recò più volte a Wheaton negli anni seguenti e divenne un buon amico di Reber. Greenstein descrive Reber come «l'inventore americano ideale. Se non si fosse interessato alla radioastronomia avrebbe fatto milioni di dollari».

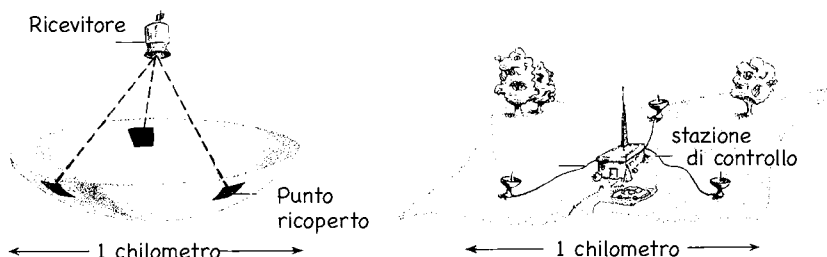
Entusiasta della ricerca di Reber, Greenstein cercò pochi anni dopo di farlo arrivare all'Università di Chicago. «L'Università non voleva spendere un centesimo nella radioastronomia», ricorda Greenstein. Ma Otto Struve, direttore dell'Osservatorio Yerkes, si disse favorevole a un incarico di ricerca purché il denaro necessario per pagare Reber e finanziare la sua ricerca arrivasse da Washington. Ma Reber era «un tipo dannatamente indipendente», dice Greenstein. Si rifiutò di spiegare nei dettagli alla burocrazia in che modo sarebbero stati spesi i soldi per i nuovi telescopi. L'accordo andò a monte.

Nel frattempo, la Seconda Guerra Mondiale era finita e gli scienziati che si erano dedicati agli aspetti tecnici dello sforzo bellico erano alla ricerca di nuove sfide. Tra essi vi erano fisici sperimentali che avevano inventato il radar per individuare i velivoli nemici durante la guerra. Dato che il radar non consiste in altro se non in onde radio emesse da un trasmettitore simile a un radiotelescopio che rimbalzano su un aeroplano e tornano al trasmettitore, questi fisici sperimentali erano potenzialmente pronti a dar vita al nuovo campo della radioastronomia, e alcuni di loro erano ansiosi di farlo; le sfide tecniche erano consistenti e i risultati intellettuali promettenti. Tra i molti che ci provarono, tre furono le équipe che divennero rapidamente dominanti nel settore: quella di Bernard Lovell del Jodrell Bank dell'Università di Manchester in Inghilterra; quella di Martine Ryle dell'Università di Cambridge, in Inghilterra; e un'équipe messa insieme da J.L. Pawsey e John Bolton in Australia. In America vi furono pochi sforzi degni di nota; Grote Reber continuava la sua ricerca nel campo della radioastronomia praticamente da solo.

Gli astronomi ottici (astronomi che studiano il cielo attraverso la luce[1], l'unico genere di astronomi che esisteva all'epoca) prestavano poca attenzione alla febbrile attività dei fisici sperimentali. Essi avrebbero continuato

a disinteressarsene fino a quando i radiotelescopi non sarebbero stati in grado di misurare la posizione di una sorgente nel cielo in modo abbastanza preciso da stabilire quale oggetto luminoso fosse responsabile dell'emissione di raggi X. Ciò richiedeva una risoluzione cento volte migliore rispetto a quella ottenuta da Reber, ossia un miglioramento di cento volte della precisione con cui si misuravano la posizione, le dimensioni e la forma delle radiosorgenti.

Si trattava di un ordine di miglioramento enorme. Un telescopio ottico, o anche l'occhio nudo di un essere umano, può raggiungere facilmente un'alta risoluzione perché le onde con cui lavora (la luce) hanno lunghezze d'onda molto brevi, inferiori a 10^{-6} metri. Invece, le orecchie umane non possono distinguere con grande precisione la direzione di provenienza di un suono perché le onde sonore hanno lunghezze d'onda lunghe, all'incirca un metro. Analogamente, le onde radio, con le loro lunghezze d'onda nell'ordine del metro, forniscono una bassa risoluzione – a meno che il telescopio che si usa non sia enormemente più ampio di un metro. Il telescopio di Reber era solo modestamente più grande, di qui la sua risoluzione modesta. Un miglioramento di cento volte nella risoluzione richiederebbe un telescopio cento volte più grande, approssimativamente delle dimensioni di un chilometro e/o l'uso di onde radio di lunghezza d'onda più breve, ad esempio di pochi centimetri anziché di un metro.

I fisici sperimentali ottennero effettivamente questo miglioramento di cento volte nel 1949, non attraverso la forza bruta, ma con l'intelligenza. La chiave della loro intelligenza può essere compresa attraverso un'analogia con qualcosa di semplice e di familiare (si tratta solo di un'analogia; in realtà è un po' un trucco ma dà un'idea del concetto generale). Noi esseri umani possiamo cogliere la tridimensionalità del mondo che ci circonda con l'ausilio di due soli occhi, non di più. L'occhio sinistro vede un oggetto un po' dal lato sinistro e quello destro un po' dal lato destro. Se giriamo la testa intorno ai suoi lati possiamo vedere un po' della sommità e un po' del fondo dell'oggetto; e se facessimo divergere gli occhi (come si fa in effetti con un paio di telecamere per realizzare i film in 3D con un'esagerata tridimensionalità), vedremmo ancora un po' più in là intorno all'oggetto. Tuttavia, la nostra visione tridimensionale non verrebbe enormemente migliorata dal fatto di possedere un gran numero di occhi tutt'intorno al viso. Con tutti quegli occhi in più vedremmo le cose molto più distintamente (avremmo una maggiore *sensibilità*), ma otterremmo solo modesti risultati in termini di *risoluzione* tridimensionale.

9.2 – Il principio del radiointerferometro. Sinistra: per ottenere una buona risoluzione angolare si dovrebbe disporre di un telescopio enorme, diciamo di un chilometro di ampiezza. Tuttavia, è sufficiente che solo alcuni punti (solidi) del piatto dell'antenna siano ricoperti di metallo e che riflettano le onde radio. Destra: Non è necessario che le onde radio riflesse da tali punti vengano concentrate su un'antenna e un radioricevitore al centro dell'enorme piatto. Ogni punto può invece concentrare le sue onde sulla propria antenna e il proprio ricevitore, e i radiosegnali risultanti possono essere trasportati via cavo da tutti i ricevitori a una stazione ricevente centrale, dove vengono combinati nello stesso modo in cui lo sarebbero stati nel ricevitore del grande telescopio. Il risultato è una rete di piccoli radiotelescopi i cui dati sono collegati e combinati, un radiointerferometro.

Un radiotelescopio enorme, dell'ampiezza di un chilometro, (parte sinistra della figura 9.2) sarebbe un po' come avere la faccia ricoperta di occhi. Il telescopio consisterebbe in una scodella delle dimensioni di un chilometro, ricoperta di metallo, che riflette e concentra le onde radio su un'antenna filare e un radioricevitore. Se eliminassimo tutto il metallo a eccezione di alcuni punti disseminati sulla scodella, sarebbe come se avessimo eliminato la maggior parte di quegli occhi dalla nostra faccia lasciandone solo alcuni. In entrambi i casi si ottiene una modesta perdita di risoluzione, ma una grande perdita di sensibilità. Ciò che i fisici sperimentali desideravano era una maggiore risoluzione (volevano scoprire da dove provenivano le onde radio e che forma avevano le radiosorgenti), non una maggiore sensibilità (non la capacità di individuare radiosorgenti più numerose e più fioche, almeno non per

il momento). Perciò occorreva loro solo una scodella dotata di qualche punto sensibile, non una che ne fosse interamente ricoperta.

Un modo pratico di realizzare un simile piatto ricoperto solo in alcuni punti era quello di costruire una rete di piccoli radiotelescopi collegati via cavo a una stazione radioricevente centrale (parte destra della figura 9.2). Ogni telescopio era come un punto ricoperto di metallo del piatto dell'antenna, i rispettivi cavi che trasportavano i singoli segnali radio erano come fasci radio riflessi dal piatto, e la stazione ricevente centrale che combina i segnali dei cavi era come l'antenna e il ricevitore del piatto che combina i segnali provenienti dai punti ricoperti di metallo. Queste reti di piccoli telescopi, gli elementi centrali su cui si basavano i tentativi dei fisici sperimentali, venivano chiamate *radiointerferometri*, perché il principio base del loro funzionamento era l'*interferometria*: facendo «interferire» i dati dei piccoli telescopi tra loro nel modo illustrato nella scheda 10.3 del capitolo X, la stazione ricevente centrale costruisce una mappa o immagine radio del cielo.

Dalla fine degli anni Quaranta agli anni Sessanta quelle tre équipe di fisici sperimentali (Jodrell Bank, Cambridge e Australia) fecero a gara nella costruzione di radiointerferometri sempre più grandi e sofisticati dotati di una risoluzione sempre maggiore. La prima tappa fondamentale, quella di un miglioramento pari a cento volte necessario per suscitare l'interesse degli astronomi ottici, arrivò nel 1949 quando John Bolton, Gordon Stanley e Bruce Slee dell'équipe australiana individuarono la posizione di una serie di radiosorgenti con campi di errore delle dimensioni di dieci arcominuti; ossia, quando individuarono regioni dell'ampiezza di dieci arcominuti in cui le radiosorgenti dovevano trovarsi (dieci arcominuti corrispondono a un terzo del diametro del Sole visto dalla Terra, una risoluzione molto più bassa di quella che può raggiungere l'occhio umano con la luce, ma notevolmente buona quando si ha a che fare con le onde radio). Quando i campi di errore vennero esaminati con i telescopi ottici, delle radiosorgenti, compresa Cyg A, non mostrarono alcuna luminosità degna di nota; sarebbe stata necessaria una risoluzione migliore per stabilire quali fra i tantissimi oggetti fiochi in termini ottici presenti in quei campi di errore potessero essere le vera sorgente delle onde radio. In tre campi di errore, tuttavia, vi era un oggetto insolitamente brillante in termini ottici: il residuo di un'antica supernova e due galassie distanti.

Per quanto fosse stato difficile per gli astrofisici spiegare le onde radio scoperte da Jansky che provenivano dalla nostra galassia, comprendere come

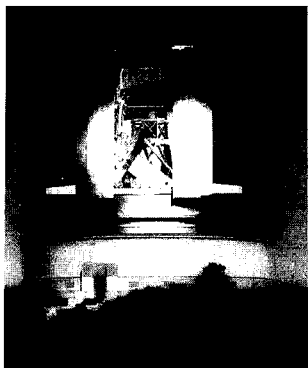
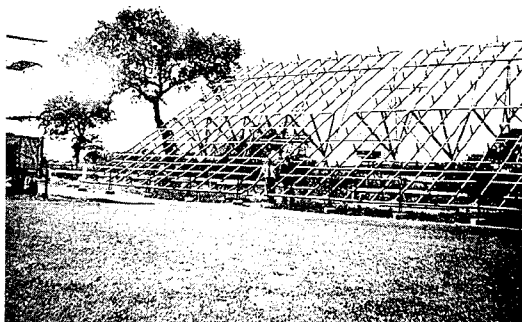
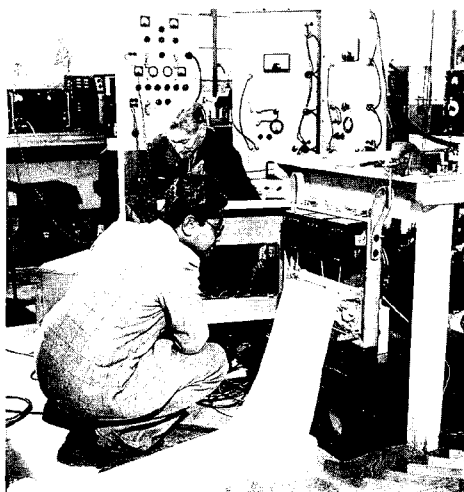
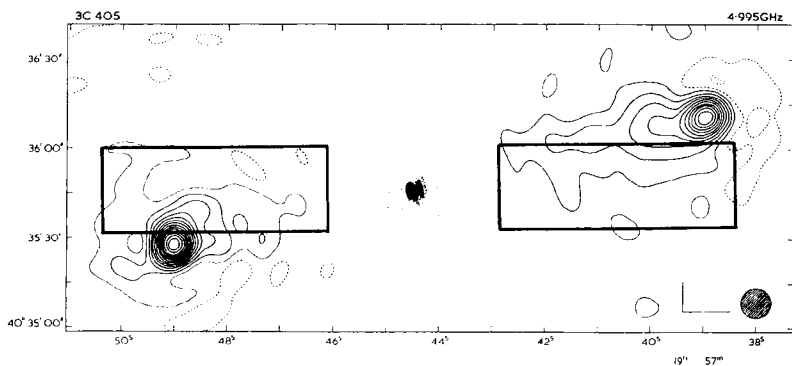
delle galassie distanti potessero emettere radiosegnali così forti, era ancora più difficile. Che alcune delle radiosorgenti più brillanti nel cielo potessero essere degli oggetti così estremamente distanti era impossibile da credere (ma alla fine si rivelò vero). Perciò sembrava più conveniente scommettere (ma coloro che lo fecero persero) che i radiosegnali di ogni campo di errore provenissero non da galassie distanti, ma da una delle tantissime stelle deboli in termini ottici, ma vicine, presenti nel campo di errore. Solo una migliore risoluzione avrebbe potuto fornire una risposta certa. I fisici sperimentali proseguirono nel loro lavoro e alcuni astronomi ottici cominciarono a gettarvi uno sguardo, con moderato interesse.

Nell'estate del 1951, l'équipe di Ryle a Cambridge aveva migliorato ancora la risoluzione di dieci volte, e Graham Smith, un dottorando di Ryle, ne approfittò per ottenere un campo di errore di un arcominuto per Cyg A, un campo abbastanza piccolo da contenere solo un centinaio di oggetti ottici (oggetti visibili mediante la luce) o giù di lì. Smith spedì per posta aerea la sua posizione stabilita per approssimazione e il suo campo di errore al famoso astronomo ottico Walter Baade alla Carnegie Institution di Pasedena (Baade era colui che diciassette anni prima, insieme a Zwicky, aveva individuato le supernovae e avanzato l'ipotesi che esse fossero alimentate da stelle di neutroni; capitolo V). La Carnegie Institution possedeva il telescopio ottico di 2,5 metri di diametro del Monte Wilson, fino a non molto tempo fa il più grande del mondo; il Caltech, a due passi da Pasadena, aveva appena finito di costruire il telescopio di 5 metri di Monte Palomar; e gli astronomi della Carnegie e del Caltech mettevano in condivisione i loro telescopi. Nella sessione di osservazione che svolse di lì a poco con il Palomar (figura 9.3a), Baade fotografò il campo di errore nella regione celeste dove secondo Smith si trovava Cyg A (quel punto del cielo, come moltissimi altri, non era mai stato esaminato prima con un grande telescopio ottico). Quando Baade sviluppò le fotografie, quasi non credeva ai suoi occhi. Lì, nel campo di errore, c'era un oggetto diverso da qualsiasi altro mai visto prima. Sembravano essere due galassie in collisione l'una con l'altra (al centro della figura 9.3d). (Oggi, grazie alle osservazioni effettuate negli anni Ottanta con i telescopi a infrarossi, sappiamo che la collisione tra le galassie era un'illusione ottica. Cyg A è in realtà una singola galassia con una fascia di pulviscolo che ne attraversa la faccia. Il pulviscolo assorbe la luce in modo da dare l'impressione che si tratti, anziché di una sola galassia, di due galassie in collisione). L'intero sistema, galassia centrale più radiosorgente, in seguito sarebbe stato chiamato *radiogalassia*.

Per due anni gli astronomi rimasero convinti che le onde radio venissero prodotte da una collisione galattica. Poi nel 1953 arrivò un'altra sorpresa. R.C. Jennison e M.K. Das Gupta dell'équipe di Lovell a Jodrell Bank studiarono Cyg A usando un nuovo interferometro che consisteva di due telescopi, uno fisso a terra e l'altro che si muoveva per i campi a bordo di un autocarro in modo da coprire, uno dopo l'altro, una serie di «punti» sul «piatto» di un immaginario telescopio di quattro chilometri quadrati (si veda la parte sinistra della figura 9.2). Con questo nuovo interferometro (figure 9.3 b, c) essi scoprirono che le onde radio di Cyg A non provenivano da «galassie in collisione», ma da due gigantesche regioni dello spazio grosso modo rettangolari di ampiezza pari a circa 200.000 anni luce e separate da una distanza di 200.000 anni luce, collocate agli estremi opposti delle «galassie in collisione». Queste regioni radiotrasmittenti, o *lobi*, sono raffigurate sotto forma di rettangoli nella figura 9.3d, insieme alla fotografia ottica di Baade delle «galassie in collisione». La figura mostra inoltre una mappa dettagliata delle emissioni radio dei lobi, realizzata sedici anni dopo utilizzando interferometri più sofisticati; questa mappa è tracciata con delle sottili linee di livello che indicano la luminosità delle emissioni radio nello stesso modo in cui le linee altimetriche di una carta topografica indicano l'altezza del territorio. Queste linee confermano la conclusione raggiunta nel 1955 secondo cui le onde radio provengono da giganteschi lobi di gas su entrambi i lati delle «galassie in collisione». In che modo entrambi questi lobi possano essere alimentati da un unico buco nero gigante sarà uno dei temi principali nel prosieguo di questo capitolo.

Queste scoperte erano abbastanza sbalorditive da suscitare, alla lunga, un forte interesse tra gli astronomi ottici. Jesse Greenstein non era più il solo a prestarvi seriamente attenzione.

Per Greenstein queste scoperte erano l'indizio definitivo. Non essendosi lanciati nello studio delle onde radio subito dopo la guerra, ora gli americani si limitavano a essere spettatori della più grande rivoluzione che avesse interessato l'astronomia da quando Galileo aveva inventato il telescopio ottico. I frutti di questa rivoluzione venivano raccolti in Inghilterra e in Australia, non in America.

Greenstein all'epoca era professore al Caltech. Vi era giunto da Yerkes per costruire un programma di astronomia imperniato sul nuovo telescopio ottico di 5 metri, e quindi ovviamente si rivolse a Lee DuBridge, presidente del Caltech, e insisté affinché il Caltech costruisse un radiointerferometro da utilizzare di pari passo con il telescopio nell'esplorazione delle galassie distanti.

(a)
(b)
(c)
3C 405
4·995GHz
36′ 30″
36′ 00″
35′ 30″
40° 35′ 00″
50s
48s
46s
44s
42s
40s
38s
19h 57m
(d)

DuBridge, essendo stato direttore del programma americano volto a realizzare il radar durante la guerra, era ben disposto, ma prudente. Per smuovere DuBridge, Greenstein organizzò una conferenza internazionale sul futuro della radioastronomia a Washington il 5 e 6 gennaio 1954.

A Washington, dopo che i rappresentanti dei radio osservatori inglesi e australiani ebbero descritto le loro notevoli scoperte, Greenstein pose questa domanda: «Gli Stati Uniti devono continuare a non avere niente da dire nel campo della radioastronomia?». La risposta era ovvia.

Con il forte appoggio della National Science Foundation, fisici, ingegneri e astronomi americani si impegnarono in un programma d'urgenza volto a realizzare un Osservatorio radioastronomico nazionale a Greenbank, nel West Virginia; e DuBridge approvò la proposta di Greenstein di dotare il Caltech di un interferometro all'avanguardia, da costruire nella Owens Valley, in California, a sudest dello Yosemite National Park. Poiché nessuno al Caltech possedeva le conoscenze necessarie per costruire uno strumento del genere, Greenstein chiamò a dirigere il progetto John Bolton dall'Australia.

9.3 – La scoperta che Cyg A è una *radiogalassia* distante: (a) Il telescopio ottico di 5 metri con cui nel 1951 Baade ha scoperto che Cyg A è collegata a quelle che sembravano essere due galassie in collisione tra loro. (b) Il radiointerferometro di Jodrell Bank usato nel 1953 da Jennison e Das Gupta per dimostrare che le onde radio provenivano da due giganteschi lobi esterni alle galassie in collisione tra loro. Le due antenne dell'interferometro (ognuna costituita da una serie di cavi avvolti attorno a una struttura di legno) qui appaiono una accanto all'altra. Durante le misurazioni una di esse veniva collocata su un autocarro e trasportata in giro per i campi mentre l'altra restava ferma sul terreno. (c) Jennison e Das Gupta mentre ispezionano i dati radio nella stanza di controllo del loro interferometro. (d) I due lobi giganti di emissioni radio (rettangoli) rilevati nelle misurazioni del 1953 e mostrati insieme alla fotografia ottica scattata da Baade delle «galassie in collisione». Sempre in (d) è riportata una carta a curve di livello ad alta definizione delle emissioni radio dei lobi (a tratto sottile continuo) tracciata nel 1969 dall'équipe di Ryle a Cambridge. [(a) Per gentile concessione dell'Osservatorio Palomar/California Institute of Technology; (b) e (c) per gentile concessione dei Nuffield Radio Astronomy Laboratories, Università di Manchester; (d) adattamento da Mitton e Ryle (1969), Baade e Minkowski (1954), Jennison e Das Gupta (1953)].

I quasar

Alla fine degli anni Cinquanta, gli americani erano diventati competitivi. I radiotelescopi a Greenbank stavano entrando in funzione e al Caltech Tom Mathews, Per Eugen Maltby e Alan Moffett con il nuovo radiointerferometro della Owens Valley lavoravano fianco a fianco con Baade, Greenstein e altri al nuovo telescopio ottico di 5 metri sul Monte Palomar, per scoprire e studiare numerose radiogalassie.

Nel 1960 questo sforzo produsse un'altra sorpresa: Tom Mathews al Caltech venne a sapere da Henry Palmer che, secondo le misurazioni del Jodrell Bank, una radiosorgente chiamata 3C48 (la quarantottesima sorgente nella terza versione di un catalogo redatto dal gruppo di Ryle a Cambridge) era estremamente piccola, non più di un arcosecondo di diametro (1/2000 della dimensione angolare del Sole). Una sorgente così piccola sarebbe stata una novità. Tuttavia, Palmer e i suoi colleghi di Jodrell Bank non erano in grado di produrre un campo di errore ridotto relativo alla sua ubicazione. Mathews, lavorando splendidamente con il nuovo radiointerferometro del Caltech, ottenne un campo di errore di appena 5 arcosecondi e lo passò ad Allan Sandage, un astronomo ottico della Carnegie Institution di Pasadena. Nella successiva sessione di osservazione al telescopio ottico di 5 metri, Sandage scattò una fotografia centrata sul campo di errore di Mathews e trovò, con sua grande sorpresa, non una galassia ma un singolo punto luminoso azzurro, che sembrava simile a una stella. «La notte successiva esaminai lo spettro, era il più strano che avessi mai visto», ricorda Sandage. Le lunghezze d'onda delle righe spettrali non erano affatto simili a quelle delle stelle o di qualsiasi gas ad alta temperatura mai prodotto sulla Terra, erano diverse da tutte quelle mai viste prima dagli astronomi o dai fisici. Sandage non riusciva a dare alcun senso a quello strano oggetto.

Nei due anni seguenti venne scoperta un'altra mezza dozzina di oggetti simili lungo la stessa rotta, tutti enigmatici come 3C48. Tutti gli astronomi ottici del Caltech e della Carnegie cominciarono a fotografarli, a registrarne gli spettri e ad arrovellarsi sulla loro natura. La risposta avrebbe dovuto essere ovvia, ma non lo era. Imperava un blocco mentale. Questi strani oggetti somigliavano tanto a delle stelle che gli astronomi continuarono a cercare di interpretarli come un tipo di stelle della nostra galassia mai visto prima, ma le interpretazioni erano orribilmente contorte e non veramente credibili.

Il blocco mentale venne forzato da Maarten Schmidt, un astronomo olandese di trentadue anni arrivato di recente al Caltech. Per mesi si era affannato

a comprendere lo spettro che aveva registrato di 3C273, uno di quegli strani oggetti. Il 5 febbraio 1963, mentre era impegnato nel suo ufficio al Caltech a tracciare accuratamente quello spettro per inserirlo in un manoscritto che stava preparando, venne folgorato dalla risposta. Le quattro righe più luminose dello spettro erano le quattro righe standard di Balmer prodotte dal gas di idrogeno, le più famose fra tutte le righe spettrali, le prime che gli studenti universitari di fisica imparavano nei loro corsi di meccanica quantistica. Tuttavia, quelle quattro righe non avevano le loro consuete lunghezze d'onda. Ognuna era spostata verso il rosso del 16%. 3C273 doveva essere un oggetto che conteneva una notevole quantità di gas di idrogeno e che si allontanava dalla Terra al 16% della velocità della luce, una velocità enormemente superiore a quella di qualsiasi stella mai osservata dagli astronomi.

Scmhidt si precipitò nell'atrio, raggiunse Greenstein e in preda all'eccitazione gli descrisse la scoperta. Greenstein si voltò e tornò in ufficio. Tirò fuori

A sinistra: Jesse L. Greenstein con un disegno del telescopio ottico da 5 metri Palomar, ca 1955. *A destra*: Maarten Schmidt con uno strumento per misurare gli spettri ottenuti con il suddetto telescopio, ca 1963. [Per gentile concessione degli Archivi del California Insititute of Technology].

il suo spettro della 3C48 e lo osservò per qualche istante. Non c'erano righe di Balmer relativamente a nessuno spostamento verso il rosso; ma le righe emesse dal magnesio, dall'ossigeno e dal neon erano lì davanti ai suoi occhi, e presentavano uno spostamento verso il rosso del 37%. La 3C48 era, almeno in parte, un'enorme quantità di gas contenente magnesio, ossigeno e neon, e si stava allontanando dalla Terra a quasi il 37% della velocità della luce.

Cosa produceva queste alte velocità? Se, come tutti avevano pensato, quegli strani oggetti (che in seguito sarebbero stati chiamati *quasar*) erano un tipo di stelle della nostra galassia, essi dovevano essere stati espulsi da qualche luogo, forse dal nucleo centrale della Via Lattea, con una forza enorme. Era un'ipotesi troppo incredibile per essere presa sul serio, e un esame più attento degli spettri dei quasar la rese estremamente improbabile. L'unica alternativa ragionevole, affermarono (correttamente) Greenstein e Schmidt era che i quasar si trovano molto lontano nell'Universo e si allontanano a gran velocità dalla Terra a causa dell'espansione dell'Universo.

Si ricordi che l'espansione dell'Universo è come l'espansione della superficie di un pallone che viene gonfiato. Se un certo numero di formiche si trova sulla superficie del pallone, ognuna di esse vedrà tutte le altre allontanarsi da sé a causa dell'espansione. Più un'altra formica si trova lontano, più la prima la vedrà allontanarsi rapidamente. Analogamente, più un oggetto distante si trova lontano dalla Terra, più noi che ci troviamo sulla Terra lo vedremo spostarsi velocemente a causa dell'espansione dell'Universo. In altre parole, la velocità dell'oggetto è proporzionale alla sua distanza. Pertanto, dalla velocità di 3C273 e 3C48 Schmidt e Greenstein poterono dedurre le loro distanze: rispettivamente 2 miliardi e 4,5 miliardi di anni luce.

Erano distanze enormi, quasi le più ampie mai registrate. Ciò significava che 3C273 e 3C48, per essere brillanti come apparivano attraverso il telescopio da 5 metri, dovevano irradiare una quantità enorme di energia: 100 volte più delle galassie più luminose mai viste.

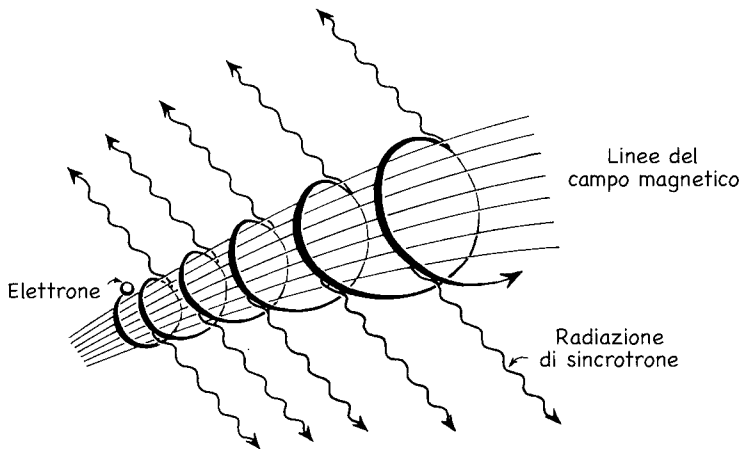
La 3C273, infatti, era così brillante che, con molti altri oggetti vicini a essa nel cielo, era stata fotografata più di 2000 volte dal 1895 utilizzando telescopi di dimensioni modeste. Venuto a conoscenza della scoperta di Schmidt, Harlan Smith dell'Università del Texas intraprese un attento esame di questo ritrovato tesoro fotografico, archiviato in gran parte a Harvard, e scoprì che la 3C273 aveva manifestato delle fluttuazioni della luminosità negli ultimi settant'anni. La luce da essa emessa cambiava sostanzialmente durante periodi lunghi appena un mese. Ciò significava che gran parte della luce della 3C273 doveva provenire da una regione più piccola della distanza che la

luce percorre in un mese, ossia più piccola di un «mese luce» (se la regione fosse più grande nessuna forza che viaggiasse, ovviamente, a una velocità inferiore o uguale a quella della luce potrebbe in alcun modo far aumentare o diminuire la luminosità del gas emesso simultaneamente con una precisione di un mese).

Le implicazioni erano difficili da accettare. Questo strano quasar, la 3C273, brillava 100 volte più luminosamente della più luminosa galassia dell'Universo; ma mentre le galassie producono la loro luce in regioni delle dimensioni di 100.000 anni luce, la 3C273 produce la sua luce in una regione dal diametro almeno un milione di volte più piccolo e dal volume 10^{18} volte inferiore: appena un mese luce o meno. La luce doveva provenire da un massivo, compatto oggetto gassoso riscaldato da un motore di enorme potenza. Il motore si sarebbe infine rivelato essere, con un'elevata ma non totale affidabilità, un buco nero gigante, ma per trovare solide prove di ciò ci sarebbero voluti altri quindici anni.

Se spiegare le onde radio di Jansky provenienti dalla nostra galassia era difficile, e spiegare quelle provenienti da radiogalassie distanti era ancora più difficile, spiegare le onde radio provenienti da questi quasar superdistanti avrebbe dovuto essere enormemente difficile.

La difficoltà, come poi si vide, risiedeva in un blocco mentale estremo. Jesse Greenstein, Fred Whipple e altri astronomi degli anni Trenta e Quaranta ritenevano che le onde radio cosmiche, come la luce delle stelle, fossero emesse dalle vibrazioni degli atomi, delle molecole e degli elettroni indotte dal calore. Gli astronomi degli anni Trenta e Quaranta non concepivano nessun altro modo in cui la natura potesse creare le onde radio osservate, anche se i loro calcoli mostravano in maniera inequivocabile che ciò non funzionava.

Un altro sistema, tuttavia, era noto ai fisici sin dall'inizio del XX secolo. Quando un elettrone che viaggia ad alta velocità incontra un campo magnetico, la forza magnetica del campo modifica il movimento dell'elettrone facendolo avvitare in una spirale. L'elettrone è costretto a procedere tracciando una spirale attorno alle linee del campo magnetico (figura 9.4), e mentre compie questa spirale emette una radiazione elettromagnetica. Negli anni Quaranta i fisici cominciarono a chiamare questa radiazione *radiazione di sincrotrone*, perché veniva prodotta facendo assumere agli elettroni il moto a spirale negli acceleratori di particelle chiamati *sincrotroni* che all'epoca si stavano costruendo. È degno di nota che negli anni Quaranta, malgrado il con-

9.4 – Le onde radio cosmiche sono prodotte da elettroni che si muovono tracciando una spirale quasi alla velocità della luce nei campi magnetici. Il campo magnetico obbliga l'elettrone a compiere una spirale invece di muoversi in linea retta, e così facendo l'elettrone produce onde radio.

siderevole interesse dei fisici per la radiazione di sincrotrone, gli astronomi invece se ne disinteressassero. Tra gli astronomi dominava un blocco mentale.

Nel 1950 Karl Otto Kiepenheuer a Chicago e Vitaly Lazarevich Ginzburg a Mosca (lo stesso Ginzburg che aveva inventato il combustibile LiD per la bomba all'idrogeno sovietica e che per primo aveva scoperto che i buchi neri non hanno peli[2]) infransero questo blocco mentale. Sulla base delle feconde idee di Hans Alfvén e Nicolai Herlofson, Kiepenheuer e Ginzburg ipotizzarono (correttamente) che le onde radio di Jansky provenienti dalla nostra galassia fossero radiazioni di sincrotrone prodotte da elettroni che si muovevano tracciando una spirale quasi alla velocità della luce attorno alle linee del campo magnetico che riempiono lo spazio interstellare (figura 9.4).

Qualche anno dopo, quando vennero scoperti i giganteschi lobi delle radiogalassie che emettevano onde radio e i quasar, fu naturale (e corretto) giungere alla conclusione che anche le loro onde radio fossero prodotte da

elettroni che si muovevano a spirale attorno a linee del campo magnetico. Sulla base delle leggi fisiche che governano questo moto a spirale e delle caratteristiche delle onde radio osservate, Geoffrey Burbidge dell'Università della California di San Diego, calcolò quanta energia dovevano possedere i campi magnetici dei lobi e gli elettroni ad alta velocità. La sua sbalorditiva risposta fu: nei casi più estremi i lobi che emettono onde radio devono avere all'incirca tanta energia magnetica e ad alta velocità (*cinetica*) quanta se ne otterrebbe convertendo l'intera massa di 10 milioni (10^7) di Soli in energia pura con un'efficienza del 100%.

I requisiti energetici dei quasar e delle radiogalassie erano talmente sbalorditivi che costrinsero gli astrofisici, nel 1963, a esaminare tutte le possibili fonti di energia in cerca di una spiegazione.

L'*energia chimica* (la combustione di benzina, petrolio, carbone o dinamite) che è alla base della civiltà umana, era chiaramente inadeguata. L'efficienza chimica nel convertire la massa in energia non è superiore a una parte per miliardo (1 parte su 10^9). Per alimentare il gas radiotrasmittente di un quasar essa richiederebbe pertanto $10^9 \times 10^7 = 10^{16}$ masse solari di combustibile chimico, 100.000 volte più di quello contenuto in tutta la Via Lattea. Sembrava del tutto irragionevole.

L'energia nucleare, la base della bomba all'idrogeno e del calore e della luce del Sole, appariva come un mezzo di marginale importanza per alimentare un quasar. L'efficienza del combustibile nucleare nel convertire la massa in energia è all'incirca pari all'1% (1 parte su 10^2), quindi un quasar avrebbe avuto bisogno di $10^2 \times 10^7 = 10^9$ (1 miliardo) di masse solari di combustibile nucleare per alimentare i suoi lobi radiotrasmittenti. E questo miliardo di masse solari sarebbe adeguato solo se il combustibile nucleare venisse bruciato interamente e l'energia risultante fosse convertita completamente in campi magnetici ed energia cinetica degli elettroni ad alta velocità. Una combustione e una conversione energetica complete apparivano estremamente improbabili. Perfino utilizzando macchinari accuratamente progettati, gli esseri umani raramente riuscivano a convertire più di una piccola percentuale dell'energia proveniente dal combustibile in energia utilizzabile, e la natura, senza un'adeguata progettazione, poteva tranquillamente fare di peggio. Pertanto 10 miliardi o 100 miliardi di masse solari di combustibile nucleare sembravano più ragionevoli. Ciò è meno della massa di una galassia gigante, ma non molto meno, e in che modo la natura potesse operare la conversione dell'energia nucleare del combustibile in campi magnetici ed energia cinetica

era tutt'altro che chiaro. Pertanto, il combustibile nucleare *era* una possibilità, ma non molto probabile.

L'annientamento della materia da parte dell'antimateria[3] potrebbe fornire una conversione al 100% della massa in energia, quindi 5 milioni di masse solari di antimateria che annientassero 5 milioni di masse solari di materia potrebbero soddisfare il fabbisogno energetico di un quasar. Tuttavia, non vi sono prove dell'esistenza dell'antimateria nel nostro Universo, fatta eccezione per delle piccole quantità create artificialmente dagli esseri umani negli acceleratori di particelle e per delle piccole quantità create dalla natura nella collisione tra particelle di materia. Inoltre, anche se una tale quantità di materia e di antimateria si annientasse in un quasar, l'energia del loro annientamento si trasformerebbe in raggi gamma ad altissima energia, e non in campi magnetici ed energia cinetica degli elettroni. Perciò l'annientamento della materia e dell'antimateria sembrava un modo molto insoddisfacente di alimentare un quasar.

Restava un'altra possibilità, *la gravità*. L'implosione di una normale stella che dava luogo a una stella di neutroni o a un buco nero poteva ragionevolmente convertire il 10% della massa della stella in campi magnetici ed energia cinetica, ma in che modo, esattamente, non era chiaro. Se ci riusciva, l'implosione di $10 \times 10^7 = 10^8$ (100 milioni) di stelle normali avrebbe potuto fornire l'energia di un quasar, come avrebbe fatto del resto un'unica, ipotetica stella supermassiva 100 milioni di volte più pesante del Sole [l'idea corretta che il buco nero gigante prodotto dall'implosione di una simile stella supermassiva potesse essere il motore che alimenta il quasar non venne in mente a nessuno nel 1963. Si sapeva molto poco dei buchi neri. Wheeler non aveva ancora coniato l'espressione «buco nero» (capitolo VI). Salpeter e Zel'dovich non avevano ancora capito che il gas attratto in un buco nero poteva riscaldarsi e irradiare con grande efficienza (capitolo VIII). Penrose non aveva ancora scoperto che un buco nero può immagazzinare fino al 29% della sua massa sotto forma di energia rotazionale e rilasciarla (capitolo VII). L'età dell'oro della ricerca sui buchi neri non era ancora iniziata].

L'idea che l'implosione di una stella destinata a creare un buco nero potesse alimentare un quasar comportava un distacco radicale dalla tradizione. Era la prima volta nella storia che gli astronomi e gli astrofisici avevano sentito il bisogno di ricorrere agli effetti della relatività generale per spiegare un oggetto che veniva osservato. Prima, i relativisti vivevano in un mondo e gli astronomi e gli astrofisici in un altro, e la comunicazione tra essi era scarsa. Ma il loro isolamento stava per finire.

Per favorire il dialogo tra relativisti, astronomi e astrofisici, e far progredire lo studio dei quasar, tra il 16 e il 18 dicembre del 1963 si tenne una conferenza che riunì trecento scienziati a Dallas, nel Texas. In un discorso dopo il ricevimento serale nell'ambito di questo First Texan Symposium on Relativistic Astrophysics, Thomas Gold della Cornell University descrisse la situazione, scherzando, ma solo fino a un certo punto: «[Il mistero dei quasar] ci suggerisce che i relativisti con il loro sofisticato lavoro non siano solo dei grandiosi ornamenti culturali, ma possano essere davvero utili alla scienza! Tutti sono contenti: i relativisti che si sentono apprezzati ed esperti in un campo che a malapena sapevano esistesse, e gli astrofisici che hanno ampliato il loro campo, il loro impero, annettendosi un altro tema – la relatività generale. È tutto molto soddisfacente, quindi speriamo che sia giusto. Sarebbe una vergogna se dovessimo mettere di nuovo da parte i relativisti».

Gli interventi si susseguirono quasi ininterrottamente dalle 8:30 del mattino alle 18, con un'ora di pausa per il pranzo, per proseguire abitualmente dalle 18 alle 2 del mattino tra discussioni e controversie informali. Infilata in mezzo agli interventi c'era una breve presentazione di dieci minuti di un matematico neozelandese, Roy Kerr, sconosciuto agli altri partecipanti. Kerr aveva appena scoperto la soluzione dell'equazione di campo di Einstein, la soluzione che un decennio più tardi sarebbe risultata descrivere tutte le proprietà dei buchi neri rotanti, compresi l'immagazzinamento e il rilascio dell'energia rotazionale (capitoli VII e XI); la soluzione che, come vedremo qui di seguito, sarebbe diventata un elemento fondamentale per spiegare l'energia dei quasar. Tuttavia, nel 1963 la soluzione di Kerr sembrò alla maggior parte degli scienziati solo una curiosità matematica; nessuno sapeva neppure che descrivesse un buco nero, anche se Kerr ipotizzava che in qualche modo potesse gettare luce sull'implosione delle stelle rotanti.

Gli astronomi e gli astrofisici erano venuti a Dallas per discutere dei quasar e non erano affatto interessati agli esoterici argomenti matematici di Kerr. Così, quando Kerr si accinse a parlare, molti lasciarono la sala conferenze per incontrarsi nell'atrio e discutere tra loro delle loro teorie preferite sui quasar. Altri, meno educati, restarono in sala a parlare tra loro a bassa voce. Molti dei rimanenti schiacciarono un pisolino nel vano tentativo di recuperare il sonno perduto a causa delle nottate passate nelle discussioni scientifiche. Solo un pugno di relativisti ascoltò con tutta l'attenzione possibile.

Era più di quanto Achilles Papapetrou, uno dei più eminenti relativisti del mondo, potesse sopportare. Quando Kerr finì, Papapetrou chiese la parola, si alzò e spiegò con parole molto sentite l'importanza dell'argomento di Kerr.

Lui, Papapetrou, aveva cercato per trent'anni di trovare una simile soluzione all'equazione di Einstein, e aveva fallito, come molti altri relativisti. Gli astronomi e gli astrofisici annuirono educatamente e poi, quando l'oratore successivo riprese a parlare della teoria dei quasar, concentrarono di nuovo la loro attenzione e il meeting acquistò slancio.

Gli anni Sessanta segnarono un punto di svolta nello studio delle radiosorgenti. Prima lo studio era completamente dominato dagli astronomi osservativi, ossia gli astronomi ottici e i fisici sperimentali dediti alle radio osservazioni, che ora vennero integrati nella comunità dell'astronomia e chiamati *radioastronomi*. Gli astrofisici teorici, invece, avevano dato scarsi contributi, perché le radio osservazioni non erano ancora abbastanza dettagliate per indirizzare le loro riflessioni teoriche. I loro unici contributi consistevano nell'aver compreso che le onde radio sono prodotte da elettroni che si muovono ad alta velocità, tracciando spirali attorno alle linee del campo magnetico nei giganteschi lobi radiotrasmittenti, e nel calcolo dell'energia magnetica e cinetica che ciò richiedeva.

Negli anni Sessanta, man mano che la risoluzione dei radiotelescopi aumentava e le osservazioni ottiche cominciavano a rivelare nuove caratteristiche delle radio sorgenti (ad esempio le esigue dimensioni dei nuclei dei quasar che emettono luce), questo crescente corpus di informazioni divenne cibo per la mente degli astrofisici. Sulla base di queste abbondanti informazioni, gli astrofisici produssero dozzine di modelli dettagliati per spiegare le radiogalassie e i quasar, per vederli poi invalidare uno dopo l'altro dall'accumularsi dei dati osservativi. Ma questo, se non altro, è il modo in cui si suppone funzioni la scienza!

Un'informazione fondamentale fu la scoperta da parte dei radioastronomi del fatto che le radiogalassie emettono onde radio non solo dai loro giganteschi doppi lobi, uno su ogni lato della galassia centrale, ma anche dal nucleo di quest'ultima. Nel 1971, ciò suggerì a Martin Rees, un recente allievo di Dennis Sciama a Cambridge, un'idea radicalmente nuova sull'alimentazione dei doppi lobi. Forse un unico motore nel nucleo della galassia era responsabile di *tutte* le onde radio della galassia stessa. Forse il motore alimentava direttamente gli elettroni e i campi magnetici del nucleo che emettevano onde radio, forse irradiava energia verso i lobi giganteschi alimentandone gli elettroni e i campi magnetici, e forse questo motore nel nucleo delle radiogalassie era dello stesso tipo (qualunque esso fosse) di quello che alimentava i quasar.

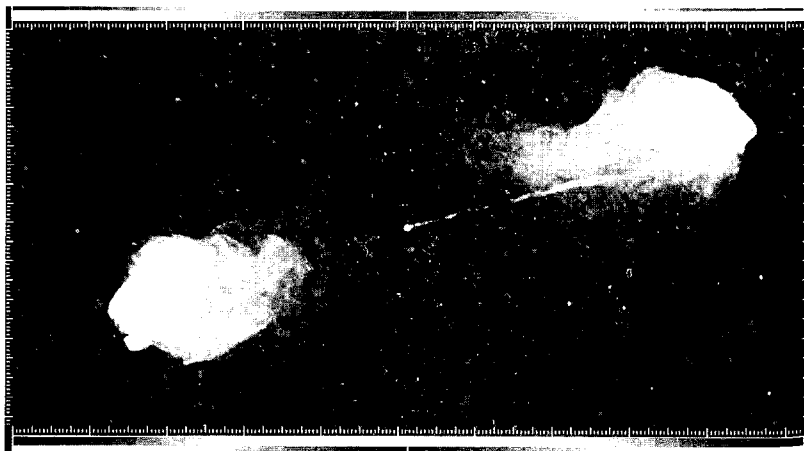
Rees all'inizio ipotizzò che i raggi che trasportano energia dal nucleo ai lobi fossero fatti di onde elettromagnetiche a frequenza ultrabassa. Tuttavia, i calcoli teorici resero presto evidente che questi raggi elettromagnetici, per quanto ci provino, non possono penetrare attraverso il gas interstellare della galassia.

Come spesso accade, l'idea non del tutto corretta di Rees ne stimolò una corretta. Malcolm Longair, Martin Ryle e Peter Scheuer a Cambridge ripresero questa idea e la modificarono in un modo semplice: conservarono i raggi di Rees, ma ipotizzarono che fossero fatti di gas caldo e magnetizzato invece che di onde elettromagnetiche. Rees concordò rapidamente sulla possibilità che questo *getto di gas* potesse funzionare e, con Roger Blandford, uno dei suoi allievi, calcolò le proprietà che esso avrebbe dovuto avere.

Pochi anni dopo, questa previsione secondo cui i lobi radiotrasmittenti erano alimentati da getti di gas emessi da un motore centrale venne confermata in modo spettacolare grazie all'impiego di nuovi, enormi radiointerferometri in Inghilterra, in Olanda e in America, in particolare con il VLA (*Very Large Array*) nella Piana di San Agustin, nel New Mexico (figura 9.5). Gli interferometri videro i getti, ed essi avevano esattamente le proprietà previste. Essi si estendevano dal nucleo della galassia ai due lobi e li si poteva perfino vedere penetrare nel gas dei lobi e rallentare fino ad arrestarsi.

Il VLA usava la stessa tecnica dei punti ricoperti sul piatto dell'antenna degli interferometri degli anni Quaranta e Cinquanta (figura 9.2), ma il suo piatto era molto più grande e usava meno punti ricoperti (molti meno radiotelescopi collegati). Esso raggiungeva la risoluzione di un arcosecondo, circa la stessa dei migliori telescopi ottici del mondo, un miglioramento impressionante se si considera la rozzezza degli strumenti originari di Jansky e Reber di quarant'anni prima. Ma i miglioramenti non si fermarono lì. Nei primi anni Ottanta si ottenevano immagini dei nuclei delle radiogalassie e dei quasar con risoluzioni 1000 volte migliori di quelle dei telescopi ottici grazie agli interferometri a lunghissima base (interferometri VLBI), composti da radiotelescopi collocati ai lati opposti di un continente o del mondo (il risultato di ogni telescopio VLBI viene registrato su un nastro magnetico assieme ad alcune indicazioni temporali fornite da un orologio atomico, e i nastri di tutti i telescopi vengono poi inseriti in un computer dove vengono fatti «interferire» gli uni con gli altri per ottenere le immagini).

Queste immagini VLBI dei primi anni Ottanta mostravano che i getti si estendono direttamente nei più interni anni luce del cuore di una galassia o di un quasar, la regione in cui risiede, nel caso di alcuni quasar come 3C273, un oggetto di luminosità brillante di dimensioni non superiori a un mese lu-

9.5 – *In alto*: Il radiointerferometro VLA nella Piana di San Augustin nel New Mexico. *In basso*: Un'immagine dell'emissione radio proveniente dalla radiogalassia Cygnus A ottenuta con il VLA da R.A. Perley, J.W. Dreyer e J.J. Cowan. Il getto che alimenta il lobo di destra è abbastanza evidente; quello che alimenta il lobo di sinistra è molto più flebile. Si noti l'enorme miglioramento nella risoluzione di questa immagine a onde radio rispetto alla carta a linee di livello di Reber del 1944 che non mostrava affatto i doppi lobi (figura 9.1d), rispetto alla radio mappa di Jennison e Das Gupta del 1953, che ne rivelava a malapena l'esistenza (due rettangoli nella figura 9.3d), e alla carta a linee di livello di Ryle del 1969 (figura 9.3d). [Entrambe le immagini per gentile concessione del NRAO/AUI].

ce. Presumibilmente, il motore centrale si trova all'interno dell'oggetto luminoso e alimenta non solo quest'ultimo, ma anche i getti che a loro volta alimentano poi i radio lobi.

I getti fornirono anche un altro indizio sulla natura del motore centrale. Alcuni getti percorrevano in modo assolutamente rettilineo distanze di un milione di anni luce o più. Se la loro fonte avesse ruotato, come la bocchetta rotante di un innaffiatoio, avrebbe prodotto dei getti curvi. Il fatto che fossero rettilinei significava che il motore centrale aveva lanciato i suoi getti esattamente nella stessa direzione per un tempo molto lungo. Quanto? Dato che i getti non possono muoversi più velocemente della luce, e dato che alcuni di essi erano più lunghi di un milione di anni luce, la direzione di emissione doveva essere rimasta costante per più di un milione di anni luce. Per raggiungere una simile stabilità, la «bocchetta» del motore che emette i getti deve essere collegata a un oggetto di una stabilità eccellente, un *giroscopio* durevole o qualcosa del genere (si ricordi che un giroscopio è un oggetto che ruota rapidamente e mantiene stabilmente fissa la direzione del suo asse di rotazione per un tempo molto lungo. Simili giroscopi costituiscono componenti fondamentali dei sistemi di navigazione inerziale per gli aeroplani e i missili).

Delle dozzine di idee che erano state proposte all'inizio degli anni Ottanta per spiegare il motore centrale, solo una contemplava un eccellente giroscopio di lunga durata, delle dimensioni inferiori a un mese luce e con la capacità di generare dei getti potenti. Quell'unica idea era un buco nero gigante rotante.

Buchi neri giganti

L'idea che dei buchi neri giganti potessero alimentare i quasar e le radiogalassie venne concepita da Edwin Salpeter e Yakov Borisovich Zel'dovich nel 1964 (il primo anno dell'età dell'oro; capitolo VII). Quest'idea era un'ovvia applicazione della scoperta di Salpeter e Zel'dovich che i flussi di gas che precipitano verso un buco nero dovrebbero collidere e irradiare (si veda la figura 8.4).

Una descrizione più completa e realistica della caduta dei flussi di gas verso un buco nero era stata messa a punto nel 1969 da Donald Lynden-Bell, un astrofisico inglese, a Cambridge. Lynden-Bell sosteneva, in modo convincente, che dopo la collisione i flussi di gas si sarebbero riuniti assieme e le forze centrifughe li avrebbero fatti procedere in una spirale continua, girando molte volte intorno al buco prima di cadervi dentro; e nel compiere questo mo-

vimento a spirale avrebbero formato un oggetto a forma di disco, simile agli anelli attorno a Saturno, un *disco di accrezione*, lo chiamò Lynden-Bell, perché il gas si va aggregando nel buco (nella parte destra della figura 8.7 è raffigurata una rappresentazione artistica di un simile disco di accrezione attorno al buco di modeste dimensioni di Cygnus X-1). Nel disco di accrezione, flussi di gas adiacenti collidono tra loro e l'intenso attrito che ne deriva riscalda il disco portandolo ad alte temperature.

Negli anni Ottanta gli astrofisici si resero conto che l'oggetto che emetteva una luce brillante al centro della 3C273, l'oggetto di dimensioni pari o inferiori a un mese luce, era probabilmente il disco di accrezione riscaldato dall'attrito di cui parlava Lynden-Bell.

Di solito pensiamo all'attrito come a una fonte di calore scarsa. Pensate al povero boy-scout che cerca di accendere un fuoco sfregando due bastoncini tra loro! Tuttavia, il boy-scout è limitato dalla sua scarsa forza muscolare, mentre l'attrito di un disco di accrezione è alimentato da energia gravitazionale. Poiché l'energia gravitazionale è enorme, molto superiore a quella nucleare, l'attrito non tarda a riscaldare il disco e a renderlo 100 volte più brillante delle galassie più luminose.

Come fa un buco nero ad agire da giroscopio? James Bardeen e Jacobus Petterson dell'Università di Yale trovarono la risposta nel 1975: quando il buco nero ruota velocemente si comporta esattamente come un giroscopio. La sua direzione di rotazione resta sempre saldamente fissa e immutabile e il vortice dello spazio in prossimità del buco creato dalla rotazione (figura 7.7) resta sempre saldamente orientato nella stessa direzione. Bardeen e Petterson dimostrarono con calcoli matematici che il vortice spaziale in prossimità del buco deve afferrare la parte interna del disco di accrezione e ancorarla saldamente al piano equatoriale del buco, e deve farlo a prescindere da come il disco sia orientato lontano dal buco (figura 9.6). Quando nuovo gas proveniente dallo spazio interstellare viene catturato nella parte distante del disco, può modificare l'orientamento di quest'ultima, ma non può mai cambiare l'orientamento del disco in prossimità del buco. L'azione giroscopica del buco lo impedisce. Vicino al buco il disco resta sempre nel piano equatoriale del buco.

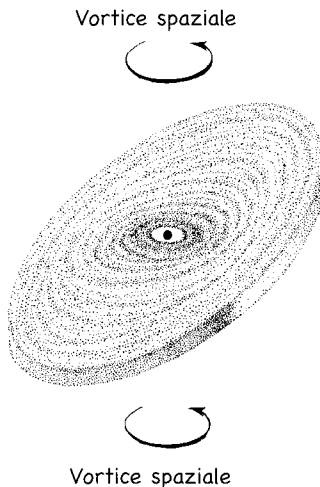
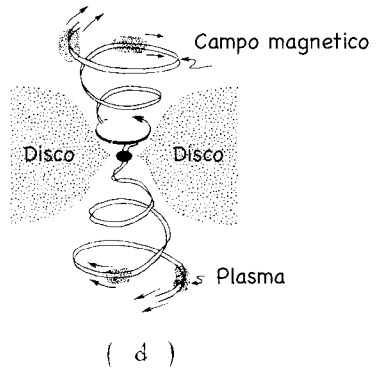
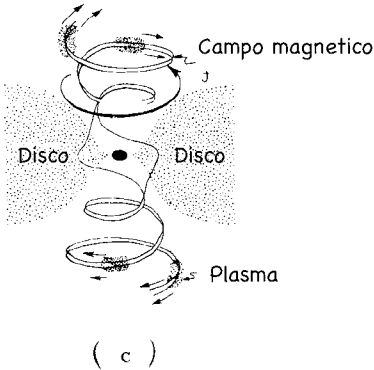
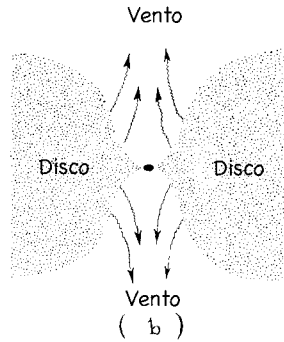
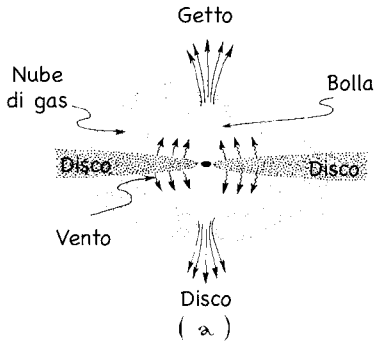
Senza la soluzione di Kerr all'equazione di campo di Einstein, questa azione giroscopica sarebbe rimasta sconosciuta e sarebbe stato impossibile spiegare i quasar. Con la soluzione di Kerr in mano, gli astrofisici a metà degli anni Settanta stavano giungendo a una spiegazione chiara ed elegante. Per la prima volta, il concetto di buco nero in quanto corpo dinamico, e non

solo un «buco nello spazio», svolgeva un ruolo centrale nella spiegazione delle osservazioni degli astronomi.

Quanto poteva essere forte il vortice spaziale in prossimità del buco gigante? In altre parole, quanto ruotano rapidamente i buchi giganti? James Bardeen dedusse la risposta. Egli dimostrò matematicamente che il gas che dal disco va ad aggregarsi nel buco deve accrescerne sempre più la rotazione. Dopo aver inghiottito tanto di quel gas, che precipita al suo interno come in un gorgo, da raddoppiare la sua massa, il buco dovrebbe ruotare quasi al massimo tasso possibile, il tasso oltre il quale le forze centrifughe impediscono ogni ulteriore accelerazione (capitolo VII). Quindi, i buchi giganti dovrebbero avere di solito quasi la massima rotazione.

In che modo un buco nero e il suo disco producono due getti orientati in direzioni opposte? Con sorprendente facilità, Blandford, Rees e Lynden-Bell dell'Università di Cambridge ci arrivarono a metà degli anni Settanta. Vi sono quattro possibili modi di produrre getti, e ognuno di essi potrebbe funzionare.

Primo, Blandford e Rees si resero conto che il disco avrebbe potuto essere

9.6 – La rotazione di un buco nero produce un vortice spaziale intorno al buco stesso, e questo vortice fissa la parte interna del disco di accrezione al piano equatoriale del buco.

9.7 – Quattro metodi attraverso i quali un buco nero o il suo disco di accrezione potrebbero alimentare dei getti gemelli. (a) Un vento proveniente dal disco soffia una bolla in una circostante nube ruotante di gas; il gas caldo della bolla apre degli orifizi nella nube, lungo il suo asse di rotazione, e da questi fuoriescono getti di gas caldo. (b) La pressione esercitata dal grande calore interno fa gonfiare il disco, e la superficie del disco gonfio e rotante forma due aperture che incanalano il vento del disco in due getti. (c) Le linee del campo magnetico ancorate al disco sono costrette a ruotare dalla rotazione orbitale del disco; ruotando, le linee di campo spingono il plasma verso l'alto e verso il basso, e il plasma, scivolando lungo le linee del campo, crea due getti magnetizzati. (d) Le linee del campo magnetico che penetrano attraverso il buco nero sono costrette a ruotare dal vortice spaziale del buco e, ruotando, spingono il plasma verso l'alto e verso il basso, creando due getti magnetizzati.

circondato da una nube di gas freddo (figura 9.7a). Un vento che spazzasse le facce superiore e inferiore del disco (analogo a quello che soffia sulla superficie del Sole) può creare una bolla di gas caldo all'interno della nube fredda. Il gas caldo può quindi aprire degli orifizi nelle facce superiore e inferiore della nube fredda e defluire attraverso di essi. Come la bocchetta di una canna per innaffiare incanala l'acqua che fuoriesce in modo da creare un flusso rapido e sottile, gli orifizi aperti nella nube fredda dovrebbero indirizzare il gas caldo che fuoriesce in modo da formare dei getti sottili. Le direzioni dei getti dipenderanno dalle ubicazioni degli orifizi. Quelle più probabili, se la nube fredda ruota intorno allo stesso asse del buco nero, si trovano lungo il comune asse di rotazione, ossia, perpendicolari al piano della parte interna del disco di accrezione; e gli orifizi così ubicati produrranno getti la cui direzione è ancorata alla rotazione giroscopica del buco nero.

Secondo, dato che il disco è molto caldo, la sua pressione interna è molto alta e può far gonfiare il disco fino a farlo diventare molto spesso (figura 9.7b). In questo caso, fece osservare Lynden-Bell, il moto orbitale del gas del disco produrrà delle forze centrifughe che creeranno dei gorghi, come dei canali, nelle facce superiore e inferiore del disco stesso. Questi canali sono esattamente analoghi al gorgo che a volte si forma quando l'acqua defluisce attraverso lo scarico di un lavandino formando un mulinello. Il buco nero è come lo scarico, e il gas del disco è come l'acqua. Le pareti dei canali a forma di gorgo dovrebbero essere così calde a causa dell'attrito nel gas da soffiare fuori un forte vento, che potrebbe venire incanalato nei getti, supponeva Lynden-Bell. Le direzioni dei getti avrebbero coinciso con quelle dei canali, a loro volta saldamente ancorati all'asse di rotazione giroscopico del buco.

Terzo, Blandford comprese che le linee del campo magnetico ancorate nel disco e che ne spuntano fuori verranno obbligate dal moto orbitale del disco a ruotare intorno (figura 9.7c). Le linee del campo ruotanti assumeranno la forma di spirali orientate verso l'esterno e verso l'alto (o verso l'esterno e verso il basso). Le forze elettriche dovrebbero ancorare il gas caldo (plasma) alle linee del campo rotanti; il plasma può scivolare lungo le linee del campo, ma non attraversarle. Dato che le linee del campo ruotano, le forze centrifughe dovrebbero spingere il plasma verso l'esterno lungo di esse in modo da formare due getti magnetizzati, uno orientato verso l'esterno e in alto, e l'altro verso l'esterno e in basso. Ancora una volta, le direzioni dei getti saranno saldamente ancorate alla rotazione del buco.

Il quarto metodo per produrre i getti è più interessante degli altri e richiede qualche spiegazione in più. In questo quarto metodo il buco è attraversato

da linee del campo magnetico come illustrato nella figura 9.7d. Ruotando, il buco trascina le linee del campo nel suo girare, facendo sì che esse spingano il plasma verso l'alto e verso il basso in modo simile a quello del terzo metodo, così da formare due getti. Questi fuoriescono lungo l'asse di rotazione del buco e la loro direzione è pertanto saldamente ancorata alla sua rotazione giroscopica. Questo metodo venne concepito da Blandford poco dopo aver conseguito il Ph.D. a Cambridge, insieme a un dottorando della stessa università, Roman Znajek, ed è quindi detto il *processo Blandford-Znajek*.

Il processo Blandford-Znajek è di particolare interesse perché l'energia dei getti proviene dall'enorme energia rotazionale del buco (ciò dovrebbe essere ovvio dato che è la rotazione del buco a far vorticare lo spazio, ed è il vortice spaziale a far ruotare le linee del campo magnetico, ed è la rotazione di tali linee a spingere il plasma verso l'esterno).

Come è possibile, in questo processo Blandford-Znajek che l'orizzonte del buco venga attraversato da linee del campo magnetico? Queste linee costituirebbero una forma di «peli» che potrebbe essere convertita in radiazioni elettromagnetiche e irradiata all'esterno, e che quindi, in base al teorema di Price (capitolo VII) *deve* essere irradiata all'esterno. In effetti, il teorema di Price è corretto solo se il buco nero si trova isolato, lontano da qualsiasi altro oggetto. Ma il buco di cui stiamo discutendo non è isolato; è circondato da un disco di accrezione. Se le linee del campo della figura 9.7d spuntano fuori dal buco, quelle che fuoriescono dall'emisfero settentrionale e quelle che fuoriescono dall'emisfero meridionale risulteranno essere la continuazione le une delle altre, e l'unico modo che tali linee hanno di uscire all'esterno è quello di aprirsi una strada attraverso il gas caldo del disco di accrezione. Ma il gas caldo non si lascerà attraversare dalle linee di campo e le confinerà saldamente nella regione dello spazio che si trova dentro la faccia interna del disco, e dato che la maggior parte di tale regione è occupata dal buco, la maggior parte delle linee del campo confinate penetra nel buco.

Da dove vengono queste linee del campo magnetico? Dal disco stesso. Tutto il gas dell'Universo è magnetizzato, almeno in parte, e il gas del disco non fa eccezione[4]. Aggregandosi a poco a poco nel buco, il gas porta con sé le linee del campo magnetico. Avvicinandosi al buco, il gas, a piccole quantità, scivola giù lungo le linee del campo magnetico e attraverso l'orizzonte, lasciandosi le linee alle spalle, emergendo dall'orizzonte e attraversandolo nel modo indicato dalla figura 9.7d. Tali linee, saldamente confinate dal disco circostante, estrarrebbero quindi l'energia rotazionale del buco mediante il processo Blandford-Znajek.

9.8 – La struttura dei quasar e delle radiogalassie secondo la migliore interpretazione di cui disponiamo attualmente. Il modello dettagliato, basato su tutti i dati osservativi, è stato elaborato da Sterl Phinney del Caltech e altri.

Tutti e quattro i metodi di produzione dei getti (gli orifizi presenti in una nube di gas, il vento che soffia attraverso dei canali, le linee di campo rotanti ancorate a un disco e il processo Blandford-Znajek) probabilmente agiscono, in vario grado, nei quasar, nelle radiogalassie e in particolari nuclei di altri tipi di galassie (detti *nuclei galattici attivi*).

Se i quasar e le radiogalassie sono alimentate dallo stesso tipo di motore a buchi neri, cosa le rende così diverse? Perché la luce dei quasar sembra provenire da un oggetto intensamente luminoso simile a una stella delle dimensioni di un mese luce o meno, mentre la luce di una radiogalassia proviene da un insieme di stelle simile alla Via Lattea delle dimensioni di 100.000 anni luce?

Sembra quasi certo che i quasar non siano molto differenti dalle radiogalassie, e anche i loro motori centrali siano circondati da una galassia di stelle delle dimensioni di 100.000 anni luce. Tuttavia, in un quasar, il buco nero centrale è alimentato a una velocità particolarmente elevata dal gas che si aggrega (figura 9.8) e, in modo corrispondente, il disco subisce a causa dell'attrito un forte riscaldamento. Questo enorme riscaldamento fa risplendere il disco con tale forza che la sua luminosità ottica è centinaia o migliaia di volte superiore a quella di tutte le stelle della galassia circostante messe insieme. Gli astronomi, accecati dallo splendore del disco, non riuscivano a vedere le stelle della galassia e pertanto l'oggetto appariva «quasi stellare» (ossia, simile a una stella, come un minuscolo punto intensamente luminoso), anziché simile a una galassia[5].

La regione più interna del disco è così calda che emette raggi X; un po' più all'esterno, il disco è più freddo ed emette una radiazione ultravioletta; procedendo ancora verso l'esterno, il disco è ancora un po' più freddo ed emette una radiazione ottica (luce); e nella regione più esterna, il disco è ancora più freddo ed emette una radiazione infrarossa. La regione che emette luce è solitamente delle dimensioni di un anno luce, anche se in certi casi, come quello della 3C273, può essere di un mese luce o più piccola e quindi la sua luminosità può variare nell'arco di periodi inferiori al mese. Gran parte dei raggi X e della luce ultravioletta che si riversano fuori della regione più interna del disco colpisce e riscalda le nubi di gas distanti diversi anni luce dal disco; sono queste nubi riscaldate che emettono le righe spettrali grazie alle quali i quasar sono stati scoperti per la prima volta. Un vento magnetizzato che soffi fuori del disco, in alcuni quasar ma non in tutti, può essere abbastanza forte e ben incanalato da produrre getti che trasmettono onde radio.

In una radiogalassia, diversamente da quanto avviene nei quasar, il disco di accrezione centrale si trova presumibilmente in stato di quiescenza. Quie-

scenza significa un lieve attrito nel disco, e quindi un riscaldamento moderato e poca luminosità, cosicché il disco brilla molto meno del resto della galassia. Perciò gli astronomi vedono la galassia e non il disco attraverso i loro telescopi ottici. Tuttavia, il disco, il buco rotante e i campi magnetici che lo attraversano producono insieme dei forti getti, probabilmente nel modo indicato nella figura 9.7d (il processo Blandford-Znajek) e questi getti sfrecciano attraverso la galassia e nello spazio intergalattico, immettendo energia negli enormi lobi della galassia che emettono onde radio.

Queste spiegazioni dei quasar e delle radiogalassie basate sui buchi neri sono così convincenti che si sarebbe tentati di dire che devono essere corrette, e che i getti emessi da una galassia devono essere un segnale che proclama «io vengo da un buco nero!». Tuttavia, gli astronomi sono alquanto cauti. Vorrebbero prove più solide. È possibile spiegare tutte le proprietà osservate delle radiogalassie e dei quasar anche usando un motore alternativo diverso da un buco nero: una stella supermassiva, magnetizzata e che ruota ad alta velocità, che pesi milioni o miliardi di volte più del Sole, un tipo di stella mai osservato dagli astronomi, ma che la teoria suggerisce potrebbe formarsi al centro delle galassie. Una simile stella supermassiva si comporterebbe in modo molto simile a un disco di accrezione. Contraendosi fino a raggiungere una dimensione piccola (ma sempre maggiore della sua circonferenza critica) potrebbe rilasciare un'enorme quantità di energia gravitazionale; questa energia, attraverso l'attrito, potrebbe riscaldare la stella in modo da farla risplendere con la stessa luminosità di un disco di accrezione; e le linee del campo magnetico ancorate nella stella potrebbero ruotare e spingere fuori il plasma sotto forma di getti.

Alcune radiogalassie e alcuni quasar potrebbero essere alimentati da queste stelle supermassive. Tuttavia, le leggi della fisica affermano che una simile stella dovrebbe gradualmente contrarsi diventando sempre più piccola, e poi, avvicinandosi alla sua circonferenza critica dovrebbe implodere per creare un buco nero. La vita totale della stella prima dell'implosione dovrebbe essere di molto inferiore all'età dell'Universo. Ciò suggerisce che, sebbene le radiogalassie e i quasar più giovani potrebbero essere alimentati da stelle supermassive, i più antichi sono invece quasi certamente alimentati da buchi neri giganti; *quasi* certamente, ma non con *assoluta* certezza. Questi argomenti non sono inoppugnabili.

Quanto sono comuni i buchi neri giganti? Le prove accumulate gradualmente durante gli anni Ottanta, suggeriscono che simili buchi si trovino non

solo nel nucleo della maggior parte dei quasar e delle radiogalassie, ma anche nel nucleo della maggior parte delle grandi galassie normali (non radiogalassie) come la Via Lattea e Andromeda, e perfino nel nucleo di alcune piccole galassie come la compagna nana di Andromeda, M32. Nelle galassie normali (la Via Lattea, Andromeda, M32) il buco nero, presumibilmente, non è circondato da un disco di accrezione, oppure sì, ma solo da un disco tenue che riversa all'esterno una modesta quantità di energia.

La prova della presenza nella nostra galassia di un simile buco nero (risalente al 1993), è suggestiva, ma lungi dall'essere certa. Un elemento di prova fondamentale viene dal moto orbitale delle nubi di gas in prossimità del centro della galassia. Le osservazioni agli infrarossi di queste nubi effettuate da Charles Townes e dai suoi colleghi dell'Università della California a Berkeley, indicano che esse orbitano intorno a un oggetto che pesa circa 3 milioni di volte più del Sole, e le radio osservazioni rivelano una sorgente radio molto particolare, anche se non intensa, nella posizione dell'oggetto centrale, una radiosorgente sorprendentemente piccola, non più grande del nostro Sistema Solare. Sono il tipo di osservazioni che ci si aspetterebbe da un buco nero quiescente di 3 milioni di masse solari dotato di un tenue disco di accrezione; ma esse possono essere spiegate anche in altri modi.

La possibilità che i buchi neri giganti esistano e si trovino nel nucleo delle galassie fu un'incredibile sorpresa per gli astronomi. A posteriori, tuttavia, è facile comprendere come buchi di questo genere possano formarsi nel nucleo di una galassia.

In qualsiasi galassia, ogni volta che due stelle si passano accanto, le loro forze gravitazionali le fanno ruotare l'una intorno all'altra e poi le spingono in direzioni diverse da quelle originarie (questo stesso tipo di avvicinamento e allontanamento modifica le orbite delle apparecchiature spaziali della NASA quando incontrano pianeti come Giove. In questo tira e molla di solito una delle stelle viene attratta verso il centro della galassia, e l'altra verso l'esterno, lontano dal centro. L'effetto cumulativo di molte di queste spinte spinge alcune stelle della galassia in profondità verso il suo nucleo. Analogamente, l'effetto cumulativo dell'attrito sul gas interstellare della galassia attira gran parte del gas verso il centro della galassia.

Man mano che il gas e le stelle si accumulano nel nucleo, la gravità dell'agglomerato che essi formano dovrebbe diventare sempre più forte. Alla fine, la gravità dell'agglomerato può diventare così forte da superare la pressione interna e l'agglomerato può implodere e dare luogo a un buco gigante.

In alternativa, le stelle massive presenti nell'agglomerato possono implodere e formare dei piccoli buchi neri, e questi possono collidere tra loro, con le stelle e con il gas e formare buchi sempre più grandi finché un unico buco nero gigante non domina il nucleo. Le stime del tempo necessario per questi fenomeni di implosione, collisione e coalescenza fanno apparire plausibile (anche se non del tutto convincente) l'ipotesi che la maggior parte delle galassie abbia visto formarsi nel suo centro dei buchi neri giganti molto prima di adesso.

Se le osservazioni astronomiche non suggerissero con forza che i nuclei delle galassie ospitano dei buchi neri giganti, gli astrofisici probabilmente non ne prevedrebbero l'esistenza neanche oggi, negli anni Novanta. Ma poiché le osservazioni in effetti suggeriscono l'esistenza di buchi neri giganti, gli astrofisici non hanno avuto difficoltà ad accettare questa ipotesi. Ciò è indicativo di quanto poco sappiamo su cosa accada veramente nel nucleo delle galassie.

Cosa ci riserva il futuro? Dobbiamo preoccuparci del fatto che il buco nero gigante presente nella Via Lattea inghiotta la Terra? Basta qualche numero per tranquillizzarci. Il buco al centro della nostra galassia (se esiste davvero) pesa circa 3 milioni di volte più del Sole e ha quindi una circonferenza di circa 50 milioni di chilometri, o 200 secondi luce, circa un decimo della circonferenza dell'orbita che la Terra traccia intorno al Sole. Si tratta di un'entità irrisoria rispetto alle dimensioni della galassia stessa. La Terra, insieme al Sole, gira attorno al centro della galassia lungo un'orbita della circonferenza di 200.000 anni luce, circa 30 miliardi di volte più ampia della circonferenza del buco. Se il buco alla fine dovesse inghiottire la maggior parte della massa della galassia, la sua circonferenza si espanderebbe solo fino a un anno luce, ancora 200.000 volte più piccola della circonferenza della nostra orbita.

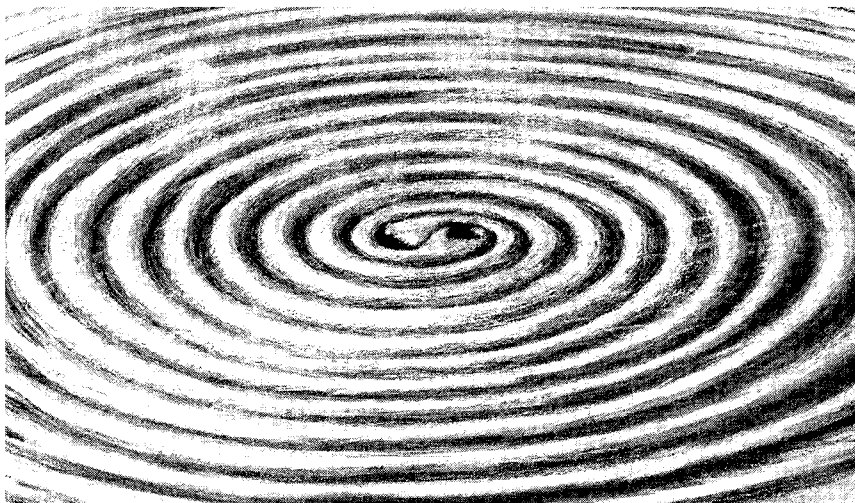
Naturalmente, nei circa 10^{18} anni (100 milioni di volte l'età attuale dell'Universo) che occorrerebbero al nostro buco centrale per inghiottire un'ampia frazione della massa della nostra galassia, l'orbita della Terra e del Sole cambierebbe sostanzialmente. Non è possibile prevedere nei particolari tali cambiamenti, dato che non conosciamo abbastanza bene l'ubicazione e il moto di tutte le altre stelle che il Sole e la Terra potrebbero incontrare nell'arco di 10^{18} anni. Pertanto, non possiamo predire se la Terra e il Sole finiranno un giorno dentro il buco al centro della galassia o se saranno spinti fuori da quest'ultima. Ma possiamo star certi che se la Terra verrà infine inghiottita, la sua scomparsa avverrà grosso modo tra 10^{18} anni, un periodo talmente lungo che nel frattempo molte altre catastrofi colpiranno quasi certamente la Terra e l'umanità.

X. INCRESPATURE DELLA CURVATURA

Dove le onde gravitazionali portano alla Terra
sinfonie cifrate dei buchi neri che collidono
e i fisici escogitano strumenti per tenere sotto controllo
le onde e decifrarne le sinfonie

Sinfonie

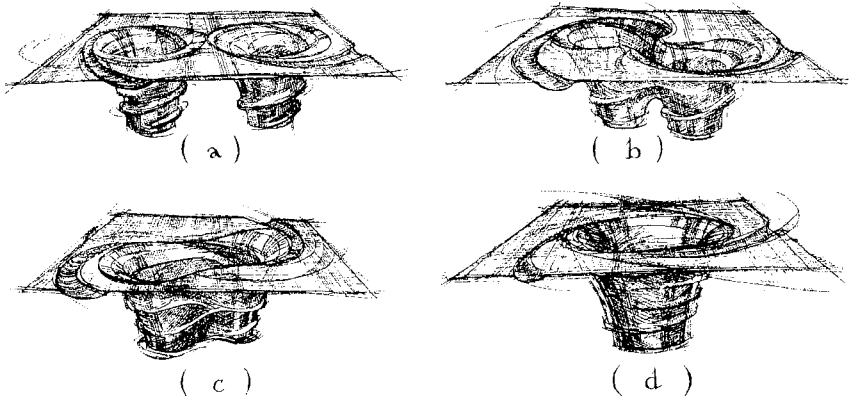
Nel nucleo di una remota galassia, un miliardo di anni luce dalla Terra e un miliardo di anni fa, si accumulò un denso agglomerato di gas e di centinaia di milioni di stelle. L'agglomerato si contrasse lentamente man mano che una stella dopo l'altra veniva allontanata e i 100 milioni di stelle rimanenti si stringevano sempre più vicine al centro. Dopo 100 milioni di anni, l'agglomerato si era ridotto alle dimensioni di alcuni anni luce e delle piccole stelle cominciarono occasionalmente a collidere e a unirsi formando stelle più grandi. Le stelle più grandi consumarono il loro combustibile e implosero formando dei buchi neri, e coppie di buchi neri, muovendosi nello spazio l'uno accanto all'altro, di tanto in tanto finirono per essere catturati e costretti a orbitare l'uno intorno all'altro.

La figura 10.1 mostra un diagramma a incasso che ne raffigura uno. Ogni buco crea una profonda cavità (una forte curvatura dello spaziotempo) nella superficie incassata, e poiché i buchi si circondano l'un l'altro, le cavità orbitanti provocano delle increspature della curvatura che si propagano all'esterno alla velocità della luce. Le increspature formano una spirale nel tessuto dello spaziotempo intorno al sistema binario, molto simile alla spirale che forma l'acqua riversata su un prato da un irrigatore che ruoti rapidamente. Così come ogni goccia d'acqua che esce dall'irrigatore vola fuori quasi radialmente, ogni piccola parte di curvatura vola quasi radialmente verso l'esterno; e come le gocce che fuoriescono formano insieme un flusso d'acqua a spirale, tutte le parti di curvatura messe insieme formano una spirale di creste e valli nel tessuto dello spaziotempo.

10.1 – Diagramma a incasso raffigurante la curvatura dello spazio nel «piano» orbitale di un sistema binario costituito da due buchi neri. Al centro vi sono due cavità che rappresentano la forte curvatura dello spaziotempo intorno ai due buchi. Queste cavità sono le stesse incontrate nei precedenti diagrammi a incasso relativi ai buchi neri, ad esempio nella figura 7.6. Orbitando l'uno intorno all'altro, i due buchi neri creano increspature nella curvatura, dette onde gravitazionali che si propagano all'esterno. [Per gentile concessione del LIGO Project, California Institute of Technology].

Poiché la curvatura dello spaziotempo è la stessa cosa della gravità, queste increspature sono in realtà onde di gravità, o *onde gravitazionali*. La teoria della relatività generale di Einstein prevede, in modo inequivocabile, che simili onde gravitazionali vengano prodotte ogniqualvolta due buchi neri orbitano l'uno intorno all'altro, e anche ogniqualvolta due stelle orbitano l'una intorno all'altra.

Al momento di partire per lo spazio esterno, le onde gravitazionali imprimono una spinta ai buchi dietro di loro in modo analogo al rinculo esercitato da un proiettile sull'arma da cui viene sparato. La spinta delle onde fa avvicinare i buchi tra loro e ne aumenta la velocità, ossia li fa muovere l'uno verso l'altro lungo una spirale rivolta all'interno. Questa spirale gradualmente rilascia energia gravitazionale, metà della quale si trasmette alle onde, e l'altra metà fa aumentare la velocità orbitale dei buchi.

Il movimento a spirale dei buchi è lento inizialmente, ma più essi si avvicinano l'uno all'altro, più veloci si muovono, più energicamente irradiano le loro increspature della curvatura e più rapidamente perdono energia e si muovono a spirale verso l'interno (figura 10.2a, b). Infine, quando ognuno dei buchi si muove quasi alla velocità della luce, i loro orizzonti si toccano e si fondono. Dove prima c'erano due buchi, ora ce n'è uno, un buco a forma di bilanciere che ruota velocemente (figura 10.2c). Mentre l'orizzonte ruota, la sua forma a bilanciere irradia increspature della curvatura e le increspature esercitano una spinta sul buco dietro di loro, riducendone gradualmente le protrusioni a bilanciere fino a farle sparire (figura 10.2d). L'orizzonte rotante

10.2 – Diagrammi a incasso raffiguranti la curvatura dello spazio intorno a un sistema binario costituito da due buchi neri. I diagrammi sono stati ritoccati dall'artista per dare la sensazione del movimento. La sequenza dei diagrammi rappresenta momenti successivi nel tempo in cui i due buchi si avvicinano sempre più l'uno all'altro. Nei diagrammi (a) e (b) gli orizzonti dei buchi sono i cerchi in fondo alle cavità. Gli orizzonti si fondono appena prima del diagramma (c) per dare vita a un unico orizzonte a forma di bilanciere. Quest'ultimo, ruotando, emette onde gravitazionali che eliminano la sua deformazione, lasciandosi alle spalle un buco nero di Kerr omogeneo e rotante come quello del diagramma (d). [Per gentile concessione del LIGO Project, California Institute of Technology].

del buco resta perfettamente omogeneo e circolare nella sua sezione equatoriale, esattamente con la forma descritta dalla soluzione di Kerr all'equazione di campo di Einstein (capitolo VII).

Osservando il buco nero omogeneo nella sua fase finale non si può in alcun modo risalire alla sua storia passata. Non si può distinguere se sia stato creato attraverso la coalescenza di due buchi più piccoli o direttamente dall'implosione di una stella fatta di materia, o direttamente dall'implosione di una stella fatta di antimateria. Il buco nero non ha «peli» che permettano di decifrarne la storia (capitolo VII).

Tuttavia, la storia non è del tutto perduta. Ne resta una testimonianza, inscritta e cifrata nelle increspature della curvatura spaziotemporale emesse dai buchi in fase di coalescenza. Queste increspature della curvatura sono simili alle onde sonore di una sinfonia. Come una sinfonia è codificata nelle modulazioni delle onde sonore (qui più ampie, lì meno; qui frequenze più alte, lì più basse), la storia della coalescenza è codificata nelle modulazioni delle increspature della curvatura. E come le onde sonore trasportano la loro sinfonia codificata dall'orchestra che le produce al pubblico, le increspature della curvatura trasportano la loro storia codificata dai buchi in fase di coalescenza fino all'Universo distante.

Se siamo abbastanza intelligenti, dovremmo essere in grado di tenere sotto controllo le increspature della curvatura dello spaziotempo al loro passaggio. I nostri computer possono tradurle in increspature di suono e così potremo ascoltare la sinfonia del buco nero: una sinfonia che gradualmente sale di tono e di intensità mentre i buchi si muovono insieme lungo le loro spirali, e poi turbina selvaggiamente quando essi si fondono in un solo buco deformato, e poi sfuma lentamente su un tono costante man mano che le protrusioni rimpiccioliscono gradualmente e poi scompaiono.

Se riusciamo a decifrarla, la sinfonia delle increspature potrebbe rivelarsi una miniera di informazioni:

1. La sinfonia conterrà un'indicazione che dirà «Vengo da un paio di buchi neri che si muovono insieme a spirale e stanno fondendosi l'uno nell'altro». Questo sarebbe il tipo di indicazione assolutamente inequivocabile sui buchi neri che gli astronomi hanno finora cercato invano ricorrendo alla luce e ai raggi X (capitolo VIII) e alle onde radio (capitolo IX). Poiché la luce, i raggi X e le onde radio vengono prodotti al di fuori dell'orizzonte del buco nero e poiché vengono emessi da un tipo di materiale (elettroni ad alta velocità e temperatura) completamente diverso da quello di cui sono fatti i buchi neri

(pura curvatura spaziotemporale), e dato che propagandosi attraverso la materia che vi si frappone possono essere fortemente distorti, essi possono darci solo poche informazioni sul buco nero e nessuna indicazione definitiva. Le increspature della curvatura (onde gravitazionali), invece, sono prodotte molto vicino agli orizzonti dei buchi in fase di coalescenza, sono fatte dello stesso materiale (una deformazione del tessuto dello spaziotempo) dei buchi, non sono affatto distorte dal loro propagarsi attraverso materiali che si frappongano a esse, e di conseguenza possono fornirci informazioni dettagliate sui buchi neri e un'indicazione inequivocabile della loro esistenza.
2. La sinfonia delle increspature può dirci come è ognuno dei buchi neri, a che velocità ruotano, la forma della loro orbita (circolare, oblunga?), in che punto del nostro cielo si trovano e quanto distano dalla Terra.
3. La sinfonia conterrà una mappa parziale della curvatura dello spaziotempo dei buchi che seguono il loro moto a spirale. Per la prima volta saremo in grado di verificare definitivamente le previsioni della relatività generale sui buchi neri. La sinfonia concorda con la soluzione di Kerr dell'equazione di campo di Einstein (capitolo VII)? La mappa mostra il vortice spaziale in prossimità del buco rotante, come richiesto dalla soluzione di Kerr? L'entità del vortice concorda con la soluzione di Kerr? Il modo in cui il vortice cambia man mano che ci si avvicina all'orizzonte concorda con la soluzione di Kerr?
4. La sinfonia descriverà la fusione degli orizzonti dei due buchi e le violente vibrazioni dei buchi fusi da poco, fusione e vibrazioni di cui oggi abbiamo solo una vaga idea. Ed è così perché esse sono governate da un elemento della relatività generale di Einstein che comprendiamo in misura insufficiente: la *non linearità* delle leggi (scheda 10.1). Per «non linearità» si intende la propensione dell'intensa curvatura stessa a produrre ulteriore curvatura, in modo simile a una valanga in cui un rivolo di neve che comincia a scivolare trascina con sé altra neve che a sua volta fa presa su altra neve e alla fine si mette in moto l'intero fianco di una montagna. Comprendiamo la non linearità in un buco nero quiescente, dove essa è ciò che tiene insieme il buco stesso; è la «colla» del buco. Ma non comprendiamo cosa faccia la non linearità, come si comporti, quali siano i suoi effetti, quando l'intensa curvatura è violentemente dinamica. La fusione e le vibrazioni di due buchi costituiscono un promettente «laboratorio» in cui cercare di arrivare a una maggiore comprensione. Quest'ultima può essere ottenuta solo attraverso una stretta cooperazione tra fisici sperimentali, che si occupano di monitorare la sinfonia delle increspature provenienti dalla fusione dei buchi neri nell'Universo distante, e i fisici teorici, che simulano la fusione con i loro supercomputer.

Scheda 10.1

LA NON LINEARITÀ E LE SUE CONSEGUENZE

Una quantità è detta *lineare* se le sue dimensioni totali corrispondono alla somma delle sue parti; altrimenti è *non lineare*.

Il reddito della mia famiglia è lineare: è la somma dello stipendio di mia moglie e del mio. La quantità di denaro che ho nel mio fondo pensione è non lineare: non è la somma di tutti i contributi che ho versato in passato, ma è molto maggiore di quella somma perché ogni contributo ha cominciato a maturare interessi quando è stato investito e i relativi interessi hanno a loro volta maturato interessi.

Il volume di acqua che scorre in un condotto fognario è lineare: è la somma degli scarichi di tutte le abitazioni che li riversano nelle tubature. Il volume di neve che precipita in una valanga è non lineare: un'esigua quantità di neve può far franare l'intero fianco di una montagna.

I fenomeni lineari sono semplici, facili da analizzare e da prevedere. I fenomeni non lineari sono complessi e difficili da prevedere. I fenomeni lineari mostrano solo alcuni tipi di comportamento, sono facili da classificare. I fenomeni non lineari presentano una grande varietà, una varietà che gli scienziati e gli ingegneri hanno cominciato ad apprezzare solo in anni recenti, quando hanno iniziato a occuparsi di un tipo di comportamento non lineare chiamato *caos* (per una valida introduzione al concetto di caos si veda Gleick, 1987).

Quando è blanda (come nel Sistema Solare), la curvatura dello spaziotempo è molto prossima a essere lineare; ad esempio le maree degli oceani terrestri

Per arrivare a questa conoscenza occorrerà monitorare le increspature sinfoniche della curvatura prodotte dai buchi. In che modo potremmo farlo? La chiave è la natura fisica della curvatura: la curvatura dello spaziotempo è la stessa cosa della marea gravitazionale. La curvatura dello spaziotempo provocata dalla Luna fa alzare le maree negli oceani terrestri (figura 10.3a) e le increspature della curvatura spaziotemporale in un'onda gravitazionale dovrebbero analogamente sollevare maree oceaniche (figura 10.3b).

La relatività generale afferma tuttavia che le maree degli oceani sollevate dalla Luna e quelle sollevate da un'onda gravitazionale differiscono tra loro

sono la somma delle maree provocate dalla curvatura spaziotemporale (marea gravitazionale) della Luna e di quelle provocate dal Sole. Invece, quando la curvatura dello spaziotempo è intensa (come nel Big Bang e vicino ai buchi neri), le leggi della relatività generale di Einstein prevedono che essa sia estremamente non lineare, tra i fenomeni più non lineari dell'Universo. Tuttavia, ancora non disponiamo quasi di nessun dato sperimentale o osservativo che mostri gli effetti della non linearità gravitazionale, e siamo così incapaci di risolvere l'equazione di Einstein che le nostre soluzioni ci hanno portato a comprendere la non linearità solo nelle situazioni semplici, ad esempio, intorno a un buco nero rotante e quiescente.

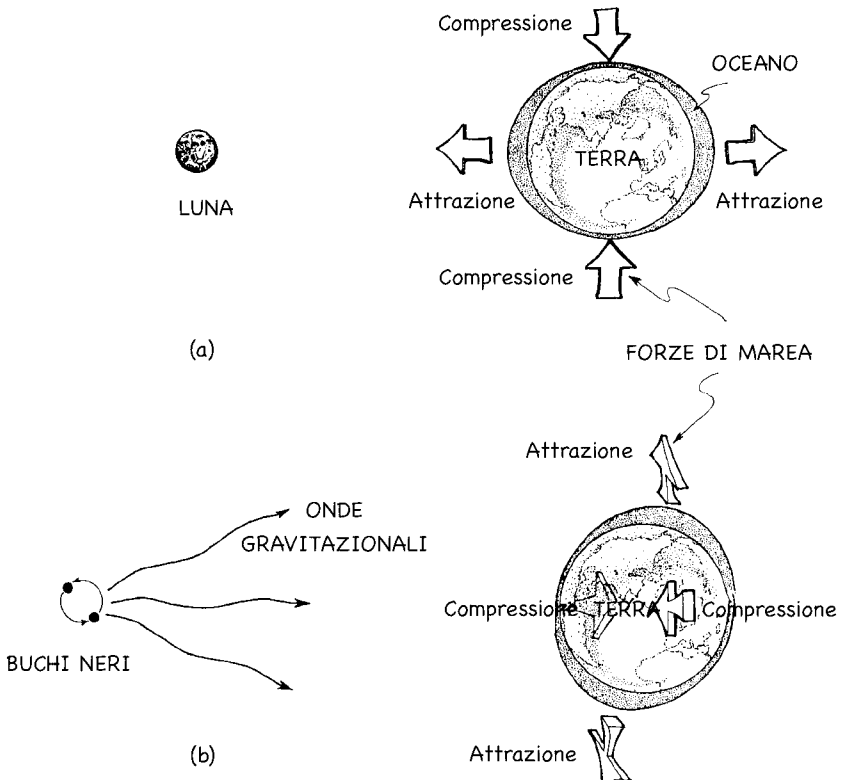
Un buco nero quiescente deve la sua esistenza alla non linearità gravitazionale; senza di essa non potrebbe persistere, esattamente come senza la non linearità gassosa la grande macchia rossa del pianeta Giove non potrebbe persistere. Quando la stella che implode e forma un buco nero scompare attraverso l'orizzonte del buco, perde la capacità di influire su di esso in qualsiasi modo, e, cosa più importante, la gravità della stella non può più tenere insieme il buco. Il buco quindi continua a esistere unicamente grazie alla gravità non lineare: la curvatura spaziotemporale del buco si rigenera continuamente in modo non lineare, senza l'aiuto della stella; e la curvatura autogenerata agisce da «collante» non lineare per tenersi insieme.

Il buco nero quiescente aguzza la nostra fame di conoscenza. Quali altri fenomeni può produrre la non linearità gravitazionale? Qualche risposta può venire dal monitoraggio e dalla decifrazione delle increspature della curvatura dello spaziotempo provocate dalla fusione dei buchi neri. Potremmo osservarvi comportamenti caotici e bizzarri che non abbiamo mai previsto.

per tre aspetti principali. La prima differenza sta nella propagazione. Le forze di marea di un'onda gravitazionale (le increspature della curvatura) sono analoghe alle onde luminose o alle onde radio: viaggiano dalla loro sorgente fino alla Terra alla velocità della luce, oscillando durante il tragitto. Le forze di marea della Luna, invece, sono simili al campo elettrico di un corpo carico. Come il campo elettrico è saldamente attaccato al corpo carico che lo trasporta in giro, e spunta sempre fuori come gli aculei di un porcospino, anche le forze di marea sono saldamente legate alla Luna, e quest'ultima le trasporta con sé, facendole spuntare fuori in modo immutabile sempre pronte ad affer-

rare o a tendere e comprimere qualsiasi cosa arrivi nelle vicinanze della Luna. Le forze di marea della Luna comprimono e attraggono gli oceani terrestri in un modo che sembra cambiare a distanza di qualche ora solo perché la Terra ruota attorno a esse. Se la Terra non ruotasse, la compressione e l'attrazione sarebbero costanti, immutabili.

La seconda differenza è nella direzione delle maree (figure 10.3 a, b): la Luna produce forze di marea in tutte le direzioni spaziali. Attira gli oceani *longi-*

10.3 – Le forze di marea prodotte dalla Luna e da un'onda gravitazionale. (a) Le forze di marea della Luna attirano e comprimono gli oceani terrestri; l'attrazione è longitudinale, la compressione è trasversale. (b) Le forze di marea di un'onda gravitazionale attirano e comprimono gli oceani terrestri; le forze sono interamente trasversali, l'attrazione avviene in una direzione trasversale e la compressione nell'altra.

tudinalmente (verso la Luna e in direzione opposta) e li comprime *trasversalmente* (in direzione perpendicolare alla direzione della Luna). Invece, un'onda gravitazionale non produce alcuna forza di marea in senso longitudinale (lungo la direzione di propagazione dell'onda). Tuttavia, sul piano trasversale, l'onda attira gli oceani in una direzione (alto-basso nella figura 10.3b) e li comprime lungo l'altra (avanti-dietro nella figura 10.3b). Lo stiramento e la compressione sono oscillatori. Quando passa la cresta dell'onda, l'attrazione avviene in direzione alto-basso e la compressione in direzione avanti-dietro; quando passa la valle dell'onda avviene un'inversione e si ha compressione in direzione alto-basso e attrazione in direzione avanti-dietro; quando arriva la cresta successiva si ha una nuova inversione e si torna alla situazione precedente.

La terza differenza tra le maree della Luna e quelle di un'onda gravitazionale sta nelle dimensioni. La Luna produce maree di circa un metro, quindi la differenza tra alta marea e bassa marea è di circa due metri. Invece, le onde gravitazionali provenienti dai buchi neri che si fondono dovrebbero produrre negli oceani terrestri delle maree di non più di 10^{-14} metri, che corrisponde a 10^{-21} delle dimensioni della Terra (e a 1/10.000 delle dimensioni di un singolo atomo, solo 10 volte più grandi del nucleo di un atomo). Dato che le forze gravitazionali sono proporzionali alle dimensioni dell'oggetto su cui agiscono (capitolo II), le onde con la loro marea distorceranno *ogni* oggetto in misura pari a circa il 10^{-21} delle loro dimensioni. In questo senso, 10^{-21} è la *forza delle onde* quando arrivano sulla Terra.

Perché le onde sono così deboli? Perché i buchi che si stanno fondendo sono così lontani. La forza di un'onda gravitazionale, come quella di un'onda luminosa, si affievolisce all'aumentare della distanza percorsa. Quando le onde sono ancora vicine ai buchi la loro forza è all'incirca pari a 1; ossia tendono e comprimono un oggetto in misura quasi pari alle sue dimensioni; gli esseri umani non sopravvivrebbero a effetti così forti. Tuttavia, quando le onde hanno ormai raggiunto la Terra, la loro forza si è ridotta in misura pari a (1/30 della circonferenza dei buchi) / (la distanza percorsa dalle onde)[1]. Per buchi che pesano circa 10 milioni di volte più del Sole e distanti un miliardo di anni luce la forza dell'onda è (1/30) x (180 chilometri, per la circonferenza dell'orizzonte) / (un miliardo di anni luce, per la distanza dalla Terra) $\simeq 10^{-21}$. Pertanto, le onde distorcono gli oceani terrestri di 10^{-21} x (10^{7} metri, per le dimensioni della Terra) = 10^{-14} metri, o 10 volte il diametro di un nucleo atomico.

Pensare di poter misurare una quantità talmente piccola rispetto al turbolento oceano terrestre è un'impresa assolutamente disperata. Non lo sono invece altrettanto le prospettive di misurare le forze di marea dell'onda

gravitazionale mediante uno strumento di laboratorio accuratamente progettato, un *rilevatore di onde gravitazionali.*

Sbarre

Joseph Weber è stato il primo a intuire che *non era* un'impresa assolutamente disperata cercare di individuare le onde gravitazionali. Diplomato in ingegneria all'Accademia Navale degli Stati Uniti nel 1940, Weber prestò servizio durante la Seconda Guerra Mondiale sulla portaerei *Lexington*, finché non fu affondata nella battaglia del Mar dei Coralli, e poi divenne ufficiale comandante del sottomarino Chaser n. 690 e guidò il generale di brigata Theodore Roosevelt jr. e millenovecento ranger allo sbarco in Sicilia nel 1943. Dopo la guerra diventò capo della sezione contromisure elettroniche dell'Ufficio navale della Marina statunitense. La sua reputazione nel campo delle radiotecnologie e dei radar era così grande che nel 1948 gli venne offerta la cattedra di ingegneria elettrica all'Università del Maryland, e divenne docente universitario a ventinove anni con una laurea di primo livello.

Mentre insegnava ingegneria elettrica all'Università del Maryland, Weber si preparava a cambiare carriera: portò termine un Ph.D. in fisica all'Università Cattolica in parte sotto la guida della stessa persona che aveva seguito John Wheeler durante il suo Ph.D., Karl Herzfeld. Da Herzfeld, Weber imparò abbastanza sulla fisica, gli atomi, le molecole e le radiazioni da inventare nel 1951 una versione del meccanismo con cui funzionano i laser; tuttavia non poté dimostrare il suo concetto sperimentalmente per mancanza di risorse. Mentre Weber pubblicava la sua invenzione, altri due gruppi di ricerca, uno alla Columbia University diretto da Charles Townes e l'altro a Mosca diretto da Nikolai Gennadievich Basov e Aleksandr Michailovich Prokharov, inventarono indipendentemente versioni alternative di quel meccanismo e poi costruirono un laser funzionante[2]. Malgrado il suo articolo fosse stata la prima pubblicazione su tale meccanismo, Weber non ricevette alcun ringraziamento; il premio Nobel e i brevetti andarono agli scienziati della Columbia e di Mosca. Deluso, ma pur sempre in rapporti di amicizia con Townes e Basov, Weber cercò un nuovo campo di ricerca.

A questo scopo passò, tra l'altro, un anno nell'équipe di John Wheeler, divenne un esperto della relatività generale e con Wheeler si dedicò alla ricerca teorica sulle previsioni della relatività generale in merito alle proprietà delle onde gravitazionali. Nel 1957 aveva ormai trovato il suo nuovo campo.

Si sarebbe dedicato al primo tentativo al mondo di costruire un apparecchiatura per individuare e monitorare le onde gravitazionali.

Dalla fine del 1957, per tutto il 1958 e gli inizi del 1959 Weber si diede da fare a inventare tutti i meccanismi che poteva per individuare le onde gravitazionali. Era un esercizio a base di carta, penna e intelligenza, non sperimentale. Egli riempì trecento pagine di appunti con idee, possibili progetti di rilevatori e calcoli relativi al funzionamento che ci si attendeva da ogni progetto. Scartò le varie idee una dopo l'altra in quanto non convincenti. Un progetto dopo l'altro risultò privo dell'alta sensibilità necessaria, ma qualcuno era promettente, e tra questi Weber scelse infine una sbarra cilindrica di alluminio di due metri di lunghezza, mezzo metro di diametro e del peso di una tonnellata, rivolta nel senso della larghezza verso le onde in arrivo (figura 10.4).

Poiché la forza di marea delle onde oscilla, essa avrebbe dovuto prima comprimere, poi tendere, poi di nuovo comprimere le estremità della sbarra. La sbarra ha un modo naturale di vibrazione che può rispondere a questa forza di marea oscillante entrando in risonanza, un modo in cui le estremità vibrano in dentro e in fuori rispetto al proprio centro. Questo modo naturale, come il suono di una campana, di un diapason o di un bicchiere da vino ha una frequenza ben definita. Così come è possibile far risuonare per simpatia una campana, un diapason o un bicchiere da vino mediante onde sonore che corrispondano alla loro frequenza naturale, è possibile far risuonare per simpatia anche la sbarra attraverso forze di marea oscillanti che corrispondano alla sua frequenza naturale. Per usare la sbarra come un rilevatore di onde gravitazionali, occorre quindi adeguarne le dimensioni in modo che la sua frequenza naturale corrisponda a quella delle onde gravitazionali in arrivo.

Quale sarà questa frequenza? Nel 1959, quando Weber si accingeva a intraprendere questo progetto, erano in pochi a credere ai buchi neri (capitolo VI), e quelli che vi credevano sapevano pochissimo sulle loro caratteristiche. Nessuno immaginava allora che i buchi potessero collidere e fondersi ed emettere increspature della curvatura spaziotemporale contenenti informazioni cifrate sulle loro collisioni. E nessuno era in grado di offrire indicazioni promettenti circa altre fonti di onde gravitazionali.

Perciò Weber si lanciò nel progetto quasi alla cieca. Il suo unico punto di riferimento consisteva nella tesi rozza (ma corretta) secondo cui le onde gravitazionali probabilmente dovevano avere frequenze inferiori a circa 10.000 Hertz (10.000 cicli al secondo), dato che tale è la frequenza orbitale di un oggetto che si muove alla velocità della luce (la massima possibile) intorno alla stella più compatta che si possa concepire: una stella di circonferenza

prossima a quella critica. Così Weber progettò i rilevatori migliori che poté lasciando che le loro frequenze di risonanza si trovassero in qualche punto al di sotto dei 10.000 Hertz, e sperò che l'Universo producesse delle onde alle frequenze da lui prescelte. Ebbe fortuna. Le frequenze di risonanza delle sue sbarre erano intorno ai 1000 Hertz (1000 cicli di oscillazione al secondo), e a quanto pare alcune delle onde provenienti dai buchi neri che si fondono dovrebbero oscillare proprio a queste frequenze, e altrettanto dovrebbero fare alcune delle onde provenienti dalle esplosioni di una supernova e da coppie di stelle di neutroni che si fondono.

10.4 – Joseph Weber mostra i cristalli piezoelettrici incollati intorno al centro della sua sbarra di alluminio; ca 1973. Le onde gravitazionali dovrebbero trasmettere vibrazioni alla sbarra da un estremo all'altro e tali vibrazioni dovrebbero comprimere i cristalli alternativamente in modo da produrre voltaggi oscillanti che vengono rilevati elettronicamente. [Fotografia di James P. Blair, per gentile concessione della National Geographic Society].

L'aspetto più complesso del progetto di Weber era quello di inventare un *sensore* per monitorare le vibrazioni delle sue sbarre. Le vibrazioni indotte dalle onde, secondo le sue previsioni, sarebbero state minuscole, più piccole del diametro del nucleo di un atomo [ma egli non sapeva, negli anni Sessanta, quanto minuscole: appena 10^{-21} x (i 2 metri di lunghezza della sua sbarra) $\not\asymp 10^{-21}$ metri o un milionesimo del diametro di un nucleo atomico, secondo le stime più recenti]. Alla maggior parte dei fisici della fine degli anni Cinquanta e degli anni Sessanta appariva impossibile misurare anche solo un decimo del diametro di un nucleo atomico. Ma non a Weber. Egli inventò un sensore adatto a questo compito.

Il sensore di Weber si basava sull'*effetto piezoelettrico*, in cui certi tipi di materiali (certi cristalli e ceramiche), quando vengono leggermente compressi, sviluppano voltaggi elettrici da un capo all'altro. Weber avrebbe voluto fare la sua sbarra di un materiale di questo tipo, ma risultava troppo costoso, e quindi adoperò il materiale che costituiva la seconda scelta migliore: fece la sua sbarra di alluminio e poi vi incollò intorno al centro dei cristalli piezoelettrici (figura 10.4). Quando la sbarra vibrava, la sua superficie comprimeva e tendeva i cristalli, ognuno di essi sviluppava un voltaggio oscillante e Weber collegò insieme i cristalli uno dopo l'altro in un circuito elettrico in modo che i loro esigui voltaggi oscillanti si cumulassero in un voltaggio abbastanza consistente da essere rilevato elettronicamente, anche nel caso in cui le vibrazioni della sbarra erano pari solo a un decimo del diametro del nucleo di un atomo.

Nei primi anni Sessanta Weber era una figura isolata, il solo fisico sperimentale al mondo che cercasse le onde gravitazionali. Amareggiato da come erano andate le cose nel caso del laser, apprezzava la solitudine. Tuttavia, agli inizi degli anni Settanta, la mole impressionante dei suoi dati e gli indizi che suggerivano che stesse effettivamente rilevando onde gravitazionali (cosa che a posteriori sono convinto non stesse facendo) attirarono dozzine di altri sperimentatori, e negli anni Ottanta più di trecento sperimentatori di talento erano in competizione con lui nel tentativo di rendere l'astronomia a onde gravitazionali una realtà.

Incontrai Weber per la prima volta sul fianco di una montagna di fronte al Monte Bianco sulle Alpi francesi nell'estate del 1963, quattro anni dopo che egli aveva intrapreso il suo progetto di rilevazione delle onde gravitazionali. Ero un dottorando che stava appena cominciando le ricerche nel campo della relatività, e insieme ad altri trentacinque studenti provenienti da ogni parte del mondo ero venuto sulle Alpi per un corso estivo intensivo di due

mesi dedicato unicamente alle leggi della gravità in base alla relatività generale di Einstein. I nostri insegnanti erano i massimi esperti mondiali nel campo della relatività, John Wheeler, Roger Penrose, Charles Misner, Bryce DeWitt, Joseph Weber e altri, e noi apprendevamo da loro durante le lezioni e nelle conversazioni private, con le nevi scintillanti dell'Aguille du Midi e del Monte Bianco che svettavano nel cielo sopra di noi, tra lo scampanio delle mucche che pascolavano sui prati verdi attorno a noi e il pittoresco villaggio di Les Houches a qualche centinaio di metri sotto di noi, ai piedi della collina su cui sorgeva la nostra scuola.

In questa magnifica cornice, Weber parlò delle onde gravitazionali e del suo progetto di rilevarle, e io ascoltavo affascinato. Tra una lezione e l'altra io e Weber parlavamo di fisica, della vita e di alpinismo e finii per considerarlo come un'anima gemella. Eravamo entrambi solitari, e nessuno di noi due amava le intense competizioni e i vivaci scambi intellettuali. Preferivamo affrontare i problemi da soli, chiedendo di tanto in tanto consigli e idee agli amici, senza sentirci spintonati da altri che cercavano di arrivare prima di noi a una nuova intuizione o scoperta.

Nel decennio successivo, quando la ricerca sui buchi neri si ravvivò ed entrò nella sua età dell'oro (capitolo VII) cominciai a trovare sgradevole l'argomento: troppa intensità, troppa competizione, troppe dispute. Così mi guardai intorno per individuare un altro settore di ricerca dove muovermi più liberamente, in cui riversare la maggior parte della mia attività pur dedicandomi ancora in parte ai buchi neri e ad altre questioni. Ispirato da Weber, scelsi le onde gravitazionali.

Al pari di Weber consideravo quello delle onde gravitazionali un campo di ricerca vergine con un brillante futuro; dedicandomi a esso fin dai suoi inizi avrei potuto divertirmi a plasmarlo, a gettare le fondamenta su cui altri avrebbero poi costruito, e avrei potuto farlo senza avere il fiato sul collo, dato che la maggior parte dei relativisti si stava dedicando ai buchi neri.

Per Weber le fondamenta da gettare erano sperimentali: l'invenzione, la costruzione e il continuo miglioramento di rilevatori. Per me, erano teoriche: cercare di capire cosa avevano da dire le leggi della gravità di Einstein sul modo in cui le onde gravitazionali vengono prodotte, su come imprimono una spinta alle loro fonti quando vengono emesse e su come si propagano; cercare di immaginare quali tipi di oggetti astronomici avrebbero prodotto le onde più forti dell'Universo, quanto sarebbero state forti e con quali frequenze avrebbero oscillato; inventare strumenti matematici per calcolare i dettagli delle sinfonie cifrate prodotte da questi oggetti, così quando Weber

e altri avessero infine rilevato le onde, sarebbe stato possibile confrontare la teoria e gli esperimenti.

Nel 1969 passai sei settimane a Mosca, su invito di Zel'dovich. Un giorno Zel'dovich si prese una pausa e invece di bombardare me e gli altri con nuove idee (capitoli VII e XII) mi portò all'Università di Mosca per presentarmi un giovane fisico sperimentale, Vladimir Braginsky. Braginsky, stimolato da Weber, aveva lavorato per diversi anni all'elaborazione di tecniche per rilevare le onde gravitazionali; era il primo sperimentatore dopo Weber a entrare in questo campo. Egli si stava inoltre dedicando ad altri esperimenti affascinanti: la ricerca dei *quark* (gli elementi di base costitutivi dei protoni e dei neutroni) e a un esperimento volto a verificare l'affermazione di Einstein secondo cui tutti gli oggetti, a prescindere dalla loro composizione, precipitano

A sinistra: Joseph Weber, Kip Thorne e Tony Tyson a una conferenza sulla radiazione gravitazionale a Varsavia, settembre 1973. *A destra*: Vladimir Braginsky e Kip Thorne a Pasadena, ottobre 1984. [A sinistra: fotografia di Marek Holzman, per gentile concessione di Andrzej Trautman; a destra: per gentile concessione di Valentin R. Rudenko].

con la stessa accelerazione in un campo gravitazionale (un'affermazione che sta alla base della descrizione data da Einstein della gravità come curvatura dello spaziotempo).

Ero impressionato. Braginsky era intelligente, profondo, e aveva una conoscenza raffinata della fisica, era caloroso e schietto, buon conversatore di politica come di scienza. Diventammo presto buoni amici e imparammo a rispettare la visione del mondo che aveva ognuno di noi. Per me, un democratico *liberal* nello spettro politico americano, la libertà individuale veniva prima di ogni altra considerazione. Nessun governo aveva il diritto di determinare come le persone devono vivere. Per Braginsky, un comunista non dottrinario, veniva prima la responsabilità del singolo nei confronti della società. Siamo i custodi dei nostri fratelli, e se non siamo vigili potremmo ritrovarci in un mondo dominato da persone malvagie come Iosif Stalin.

Braginsky era lungimirante come nessun altro. Durante il nostro incontro nel 1969 e poi ancora nel 1971 e nel 1972 mi avvisò che le sbarre che venivano usate per cercare le onde gravitazionali presentavano un limite fondamentale, definitivo. Il limite, mi disse, derivava dalle leggi della meccanica quantistica. Malgrado di solito si pensi che la meccanica quantistica governi oggetti come gli elettroni, gli atomi e le molecole, se effettuiamo misurazioni sufficientemente precise sulle vibrazioni di una sbarra di una tonnellata, troveremo che anche quelle vibrazioni hanno un comportamento quantistico, che in ultima analisi creerà problemi nella rilevazione delle onde gravitazionali. Braginsky si era convinto di ciò effettuando calcoli sui risultati definitivi forniti dai cristalli piezoelettrici di Weber e di altri tipi di sensori utilizzabili per misurare le vibrazioni di una sbarra.

Non capivo di cosa stesse parlando Braginsky, non capivo il suo ragionamento, né le sue conclusioni e la loro importanza, e così non vi prestai attenzione. Altre cose che mi stava insegnando mi sembravano molto più importanti: da lui appresi come immaginare gli esperimenti, come progettare le apparecchiature sperimentali, come prevedere il rumore di fondo che affliggerà l'apparecchiatura e come eliminarlo in modo che essa riesca a svolgere il suo compito; e da me Braginsky stava imparando come riflettere sulle leggi della gravità di Einstein, come individuarne le previsioni. Diventammo rapidamente una squadra dove ognuno contribuiva all'impresa comune con le proprie conoscenze e la propria esperienza, e nei decenni seguenti ci saremmo divertiti molto insieme e avremmo fatto qualche scoperta.

Dagli inizi degli anni Settanta e fino a metà del decennio, ogni volta che ci incontravamo a Mosca o a Pasadena, a Copenaghen o a Roma, Braginsky mi

ripeteva il suo ammonimento circa i problemi quantistici dei rilevatori di onde gravitazionali, e ogni volta continuavo a non capire. I suoi ammonimenti erano alquanto farraginosi perché neanche lui capiva del tutto di cosa si trattasse. Tuttavia, nel 1976, dopo che Braginsky, e in modo indipendente Robin Giffard della Stanford University, riuscirono a formulare in modo più chiaro il problema, a un tratto compresi. Mi resi finalmente conto che l'allarme era serio; la sensibilità di un rilevatore costituito da una sbarra, in ultima analisi, è seriamente limitata dal *principio di indeterminazione*.

Il principio di indeterminazione è un elemento fondamentale delle leggi della meccanica quantistica. Esso afferma che se si effettua una misurazione molto accurata della posizione di un oggetto, nel corso del processo lo si urta necessariamente, alterando in tal modo la velocità dell'oggetto in maniera casuale e imprevedibile. Più la misurazione della posizione è accurata, più seriamente e imprevedibilmente si altera la velocità dell'oggetto. Per quanto si possa essere astuti nel progettare la misurazione, non c'è modo di evitare questa incertezza intrinseca (si veda la scheda 10.2).

Il principio di indeterminazione, oltre alle misurazioni di oggetti microscopici come gli elettroni, gli atomi e le molecole, governa anche quelle di oggetti di grandi dimensioni. Tuttavia, poiché un oggetto grande ha una grande inerzia, l'urto provocato dalla misurazione ne altera solo leggermente la velocità (l'alterazione della velocità sarà inversamente proporzionale alla massa dell'oggetto).

Il principio di indeterminazione applicato a un rilevatore di onde gravitazionali dice che più accuratamente un sensore misura la posizione di un'estremità, o di un lato di una sbarra che vibra, maggiore è la forza e l'imprevedibilità dell'urto provocato dalla misurazione.

Se il sensore è poco preciso, l'urto può essere di scarsa entità e irrilevante, ma dato che è poco preciso non si conosce perfettamente l'ampiezza delle vibrazioni della sbarra e perciò non si possono monitorare le onde gravitazionali deboli.

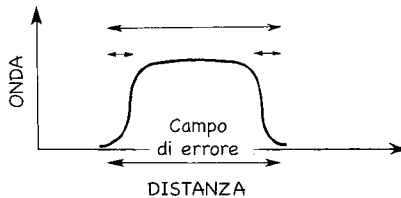
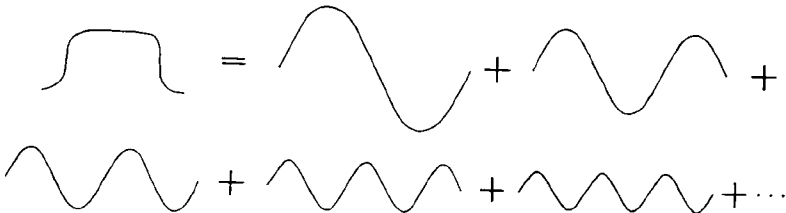
Se il sensore è estremamente preciso, l'urto è di entità tale da alterare notevolmente le vibrazioni della sbarra. Queste alterazioni ampie e di dimensioni ignote mascherano, pertanto, gli effetti di qualsiasi onda gravitazionale si possa cercare di rilevare.

La precisione ottimale di un sensore si trova in un punto intermedio tra questi due estremi: una precisione non tanto bassa da fornire scarse informazioni né tanto alta da rendere troppo consistente il disturbo. Alla precisione

Scheda 10.2

IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE E IL DUALISMO ONDA/PARTICELLA

Il principio di indeterminazione è intimamente legato al dualismo onda/particella (scheda 4.1), ossia, alla propensione delle particelle a comportarsi a volte come onde e a volte come particelle.

Se misurate la posizione di una particella (o di qualsiasi altro oggetto, ad esempio l'estremità di una sbarra) e scoprite che si trova da qualche parte all'interno di un qualche campo di errore, a prescindere da come l'onda della particella potesse apparire prima della misurazione, nel corso di quest'ultima l'apposita apparecchiatura «urterà» l'onda e di conseguenza la confinerà all'interno del campo di errore. L'onda in tal modo acquisterà una forma confinata simile in qualche modo a quella seguente:

Una simile onda confinata contiene molte diverse lunghezze d'onda che vanno dalle dimensioni del campo stesso (indicate con *max* in alto) alle esigue dimensioni degli angoli in cui l'onda inizia e finisce (indicate con *min*). Più specificamente, l'onda confinata può essere costruita aggiungendovi, cioè sovrapponendovi, le seguenti onde oscillanti che hanno lunghezze d'onda che vanno da *max* a *min*:

Si ricordi che più breve è la lunghezza d'onda delle oscillazioni dell'onda, maggiore è l'energia della particella, e quindi maggiore è anche la sua velocità. Poiché la misurazione ha assegnato all'onda una gamma di lunghezze d'onda, l'energia e la velocità della particella possono trovarsi in un punto qualsiasi delle rispettive gamme; in altre parole, la sua energia e velocità sono indeterminate.
Ricapitolando, la misurazione ha confinato la particella nel campo di errore (primo diagramma in alto); in tal modo all'onda è stata assegnata una gamma di lunghezze d'onda (secondo diagramma); la gamma delle lunghezze d'onda corrisponde a una gamma di energia e di velocità; e pertanto la velocità è indeterminata. Per quanto ci si sforzi, non c'è modo di evitare di provocare questa indeterminatezza della velocità quando si misura la posizione della particella. Inoltre, se la si esamina più attentamente, questa concatenazione di ragionamenti prevede che più la misurazione è precisa, ossia, più è piccolo il campo di errore, più ampia è la gamma delle lunghezze d'onda e quella della velocità, e pertanto maggiore è l'incertezza sulla velocità della particella.

ottimale, oggi chiamata *limite quantistico standard di Braginsky*, l'effetto dell'urto ha solo la stessa rilevanza degli errori commessi dal sensore. Nessun sensore può monitorare le vibrazioni della sbarra con precisione superiore al limite quantistico standard. Quanto è piccolo questo limite? Per una sbarra di 2 metri di lunghezza e del peso di 1 tonnellata, è circa 100.000 volte più piccolo del nucleo di un atomo.

Negli anni Sessanta nessuno prendeva seriamente in considerazione la necessità di misurazioni così precise perché nessuno capiva davvero quanto deboli avrebbero dovuto essere le onde gravitazionali provenienti dai buchi neri e da altri oggetti astronomici. Ma a metà degli anni Settanta, spronati dal progetto sperimentale di Weber, io e altri teorici avevamo iniziato a farci un'idea di quanto forti sarebbero state le onde gravitazionali più forti. La risposta era all'incirca 10^{-21}, e ciò significava che le onde avrebbero fatto vibrare una sbarra di due metri con un'ampiezza pari soltanto a 10^{-21} x (2 metri), o circa un milionesimo del diametro del nucleo di un atomo. Se queste stime erano corrette (e noi sapevamo che erano molto incerte), il segnale dell'onda gravitazionale sarebbe stato dieci volte più piccolo del limite quan-

tistico standard di Braginsky, e pertanto non poteva essere rilevato usando una sbarra o qualsiasi altro tipo di sensore.

Malgrado ciò fosse estremamente preoccupante, non tutto era perduto. L'intuizione profonda diceva a Braginsky che, se gli sperimentatori erano particolarmente intelligenti, dovevano riuscire a evitare il suo limite quantistico standard. Doveva esserci un nuovo modo di progettare un sensore, egli affermava, in modo che l'urto inevitabile e di cui era impossibile conoscere l'entità non occultasse l'influenza delle onde gravitazionali sulla sbarra. A questo tipo di sensore Braginsky diede il nome di *misurazione quantistica senza demolizione*[3]; «quantistica» perché l'urto del sensore è richiesto dalle leggi della meccanica quantistica, e «senza demolizione» perché il sensore verrebbe configurato in modo tale che l'urto non demolisca l'oggetto che si sta cercando di misurare, ossia l'influenza delle onde sulla sbarra. Braginsky non disponeva di un progetto concreto di un sensore quantistico senza demolizione, ma la sua intuizione gli diceva che un sensore del genere era possibile.

Questa volta ascoltai attentamente; nei due anni seguenti io e la mia équipe al Caltech e Braginsky e la sua équipe a Mosca ci affannammo con risultati alterni a inventare un sensore quantistico senza demolizione.

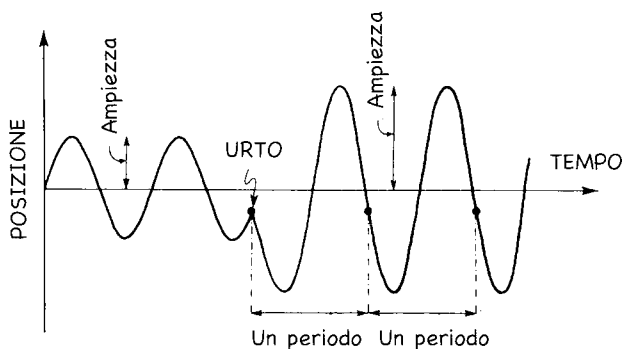
Entrambi trovammo la risposta simultaneamente nell'autunno del 1977, ma vi arrivammo per strade molto diverse. Ricordo chiaramente la mia agitazione quando nel corso di un'intensa discussione mentre pranzavamo al Greasy (la caffetteria degli studenti del Caltech) a Carlton Caves e a me venne l'idea[4]. E ricordo il sapore agrodolce della notizia che Braginsky, Yuri Vorontsov e Farhid Khalili a Mosca erano arrivati per una parte significativa alla stessa idea praticamente nello stesso momento. Agro, perché traggo grande soddisfazione dal fatto di essere il primo a scoprire qualcosa; dolce, perché sono entusiasta di Braginsky e ho piacere a condividere delle scoperte con lui.

Nell'insieme, la nostra idea del sensore quantistico senza demolizione è alquanto astratta e permette di progettare un'ampia gamma di sensori capaci di eludere il limite quantistico standard di Braginsky. La sua astrattezza, tuttavia, rende difficile spiegare l'idea, perciò in questa sede illustrerò solo un esempio (non molto pratico) di sensore quantistico senza demolizione[5]. Braginsky ha chiamato questo esempio *sensore stroboscopico.*

Un sensore stroboscopico si basa su una speciale proprietà delle vibrazioni di una sbarra. Se a una sbarra si assesta un colpo molto secco, un urto di entità ignota, l'ampiezza della sua vibrazione subirà una modifica, ma, a prescindere dall'ampiezza di tale modifica, esattamente un periodo di oscillazio-

ne dopo che l'urto è avvenuto, l'estremità vibrante della sbarra tornerà nella stessa posizione che aveva al momento dell'urto (i puntini neri nella figura 10.5). O almeno ciò vale se un'onda gravitazionale (o qualche altra forza) non ha compresso o teso la sbarra nel frattempo. Se invece un'onda (o un'altra forza) ha in effetti compresso la sbarra nel frattempo, la sua posizione dopo un periodo sarà cambiata.

Per rilevare l'onda, pertanto, si dovrebbe costruire un sensore che effettui delle misurazioni stroboscopiche delle estremità vibranti della sbarra, un sensore che misuri rapidamente la posizione delle estremità della sbarra una volta ogni periodo di oscillazione. Un sensore di questo tipo urterà la sbarra a ogni misurazione, ma gli urti non modificheranno la posizione delle estremità della sbarra al momento delle misurazioni successive. Se la posizione risulta modificata, allora un'onda gravitazionale (o qualche altra forza) deve aver compresso la sbarra.

10.5 – Il principio alla base di una misurazione stroboscopica quantistica senza demolizione. Verticalmente è indicata la posizione dell'estremità di una sbarra che vibra; orizzontalmente, il tempo. Se si effettua una misurazione rapida e molto precisa della posizione nell'istante indicato con Urto, il sensore che effettua la misurazione urterà la sbarra in modo improvviso e con un'intensità ignota, modificando in tal modo l'ampiezza della vibrazione della sbarra stessa in modo ignoto. Tuttavia, non vi sarà alcun cambiamento nella posizione dell'estremità della sbarra esattamente un periodo dopo l'urto, né dopo due o tre periodi. Le posizioni resteranno quelle che erano al momento dell'urto e saranno del tutto indipendenti da esso.

Malgrado i sensori quantistici senza demolizione avessero risolto il problema del limite quantistico standard di Braginsky, verso la metà degli anni Ottanta ero piuttosto pessimista circa le possibilità dei rilevatori a sbarre di rendere praticabile l'astronomia a onde gravitazionali. Il mio pessimismo aveva due cause.

In primo luogo, le sbarre costruite da Weber, da Braginsky e da altri avevano raggiunto sensibilità molto superiori a quelle che si potevano anche solo immaginare negli anni Cinquanta, ma riuscivano ancora a rilevare con certezza solo onde di intensità pari o superiore a 10^{-17}. Un valore diecimila volte troppo basso per un risultato positivo, se io e altri avevamo calcolato correttamente l'intensità delle onde che raggiungono la Terra. Ciò non era grave di per sé, dato che il progresso tecnologico aveva spesso prodotto miglioramenti di diecimila volte della strumentazione nell'arco di venti anni o meno (un esempio era quello della risoluzione angolare dei migliori radiotelescopi, che era migliorata dalle decine di gradi della metà degli anni Quaranta ai pochi arcosecondi della metà degli anni Sessanta; si veda il capitolo IX. Un altro era quello della sensibilità dei rilevatori astronomici di raggi X, migliorata di un fattore 10^{10} tra il 1958 e il 1978, ossia a un tasso medio di diecimila volte ogni otto anni; si veda il capitolo VIII). Ma il tasso di miglioramento delle sbarre era così lento, e le prospettive della tecnologia e delle tecniche future erano così modeste, che non sembrava ragionevole attendersi un miglioramento di diecimila volte in un futuro prevedibile. Il successo dipendeva quindi dal fatto che le onde avessero un'intensità superiore a quella stimata di 10^{-21}, una possibilità reale, ma non di quelle su cui si era felici di dover contare.

In secondo luogo, anche se fossero riuscite a rilevare le onde gravitazionali, le sbarre avrebbero avuto enormi difficoltà a decifrarne i segnali sinfonici e probabilmente non ci sarebbero riuscite. La ragione era semplice: come un diapason o un bicchiere da vino rispondono simpateticamente solo a un suono la cui frequenza è vicina alla loro frequenza naturale, un rilevatore a sbarra ha una *banda di larghezza ristretta* (la larghezza della banda è la banda di frequenze alle quali risponde). Ma le informazioni sinfoniche delle onde dovrebbero normalmente essere codificate in una banda molto larga di frequenze. Per estrarre le informazioni contenute nelle onde occorrerebbe quindi uno «xilofono» fatto di molte sbarre, ognuna capace di captare una piccola porzione differente di frequenze del segnale. Quante sbarre dovrebbe avere questo xilofono? Per i tipi di sbarre che si progettavano e costruivano allora, molte migliaia, troppe per rappresentare una soluzione pratica.

In linea di principio, sarebbe possibile ampliare la larghezza della banda delle sbarre e cavarsela più o meno con una dozzina di esse, ma ciò richiederebbe grandi progressi tecnici oltre a quelli necessari per raggiungere una sensibilità di 10^{-21}.

Anche se in pubblico, negli anni Ottanta, non esternavo il mio pessimismo, in privato la situazione mi appariva tragica a causa dei grandi sforzi che Weber, Braginsky e altri miei amici e colleghi avevano dedicato alle sbarre, e anche perché mi ero convinto che la radiazione gravitazionale era potenzialmente in grado di provocare una rivoluzione nella nostra conoscenza dell'Universo.

LIGO

Per comprendere la rivoluzione che il rilevamento e la decifrazione delle onde gravitazionali potrebbe avviare, basta ricordare i particolari di una rivoluzione precedente: quella innescata dallo sviluppo dei telescopi a raggi X e dai radiotelescopi (capitoli VIII e IX).

Negli anni Cinquanta, prima dell'avvento della radioastronomia e dell'astronomia a raggi X, la nostra conoscenza dell'Universo proveniva quasi interamente dalla luce. La luce mostrava un Universo sereno e quiescente, dominato da stelle e pianeti che ruotano uniformemente lungo le loro orbite, che brillano costantemente e richiedono milioni o miliardi di anni per subire cambiamenti percepibili alla vista.

Questa visione tranquilla dell'Universo andò in frantumi negli anni Cinquanta, Sessanta e Settanta, quando le osservazioni basate sui raggi X e le onde radio ci mostrarono la faccia violenta dell'Universo: getti emessi dai nuclei delle galassie, quasar dalla luminosità fluttuante molto più brillanti della nostra galassia, pulsar che emettono intensi fasci luminosi dalla loro superficie e ruotano ad alta velocità. Gli oggetti più brillanti osservati con i telescopi ottici erano il Sole, i pianeti, e alcune stelle quiescenti vicine. Gli oggetti più luminosi osservati dai radiotelescopi erano violente esplosioni nei nuclei delle galassie distanti, alimentate (presumibilmente) da buchi neri giganti. Gli oggetti più brillanti osservati dai telescopi a raggi X erano piccoli buchi neri e stelle di neutroni che aggregavano gas caldo proveniente dai loro compagni binari.

Cosa possedevano le onde radio e i raggi X per creare una rivoluzione tanto spettacolare? La chiave stava nel fatto che essi ci portavano informa-

zioni di tipo molto diverso da quelle della luce: la luce, con la sua lunghezza d'onda di mezzo micron, era emessa principalmente da atomi caldi ubicati nell'atmosfera di stelle e pianeti, e quindi ci informava su tali atmosfere. Le onde radio, con le loro lunghezze d'onda dieci milioni di volte maggiori, erano emesse principalmente da elettroni che si muovevano a spirale quasi alla velocità della luce entro campi magnetici, ed esse ci informavano quindi sui getti magnetizzati emessi dai nuclei delle galassie, sui lobi giganti intergalattici magnetizzati alimentati da quei getti e sui fasci magnetizzati delle pulsar. I raggi X, con le loro lunghezze d'onda migliaia di volte più corte di quella della luce, erano prodotti principalmente da elettroni ad alta velocità presenti nei gas incandescenti che si aggregano nei buchi neri e nelle stelle di neutroni, e ci informavano sul gas che si aggrega e indirettamente sui buchi neri e le stelle di neutroni.

Le differenze tra la luce da una parte, e le onde radio e i raggi X dall'altra, sono esigue rispetto a quelle che esistono tra le onde elettromagnetiche (luce, onde radio, infrarossi, ultravioletti, raggi X e raggi gamma) della moderna astronomia e le onde gravitazionali. Di conseguenza, le onde gravitazionali potrebbero rivoluzionare la nostra conoscenza dell'Universo ancor più di quanto abbiano fatto le onde radio e i raggi X. Tra le differenze che esistono tra le onde elettromagnetiche e le onde gravitazionali, e le loro conseguenze, vi sono quelle seguenti[6]:

- Le onde gravitazionali dovrebbero essere emesse con più forza da vibrazioni coerenti, su larga scala, della curvatura dello spaziotempo (ad esempio, la collisione e la coalescenza di due buchi neri) e da moti coerenti, su larga scala, di enormi ammassi di materia (ad esempio, l'implosione del nucleo di una stella che innesca una supernova, o la convergenza e la fusione di due stelle di neutroni che orbitano l'una intorno all'altra). Pertanto, le onde gravitazionali dovrebbero mostrarci i movimenti di enormi curvature e di enormi masse. Invece, le onde elettromagnetiche cosmiche sono emesse di solito singolarmente e separatamente da un numero enorme di singoli atomi o elettroni separati; e queste singole onde elettromagnetiche, ognuna oscillante in maniera leggermente diversa, si sovrappongono l'una all'altra per produrre l'onda complessiva misurata dagli astronomi. Di conseguenza, dalle onde elettromagnetiche otteniamo principalmente informazioni sulla temperatura, la densità e i campi magnetici sperimentati dagli atomi e dagli elettroni che le emettono.
- Le onde gravitazionali sono emesse con più intensità in regioni dello spa-

zio in cui la gravità è così intensa che la descrizione di Newton non è più valida e deve essere sostituita da quella di Einstein, e in cui enormi quantità di materia o di curvatura dello spaziotempo si muovono, vibrano o vorticano quasi alla velocità della luce. Esempi sono il Big Bang all'origine dell'Universo, le collisioni dei buchi neri e le pulsazioni di stelle di neutroni di recente formazione al centro delle esplosioni delle supernovae. Essendo abitualmente circondate da spessi strati di materia che assorbono le onde elettromagnetiche (ma non quelle gravitazionali), queste regioni caratterizzate da forte gravità non possono inviarci onde elettromagnetiche. Le onde elettromagnetiche osservate dagli astronomi provengono invece quasi interamente da regioni caratterizzate da debole gravità e bassa velocità, ad esempio dalle superfici di stelle e supernovae.

Queste differenze suggeriscono che gli oggetti le cui sinfonie potremmo studiare grazie a dei rilevatori di onde gravitazionali saranno in gran parte invisibili in termini di luce, onde radio e raggi X; e che gli oggetti che gli astronomi attualmente studiano attraverso la luce, le onde radio e i raggi X saranno in gran parte invisibili in termini di onde gravitazionali. L'Universo gravitazionale dovrebbe quindi apparire estremamente diverso da quello elettromagnetico; dalle onde gravitazionali dovremmo apprendere cose che non potremmo mai venire a sapere per via elettromagnetica. Questa è la ragione per cui è probabile che le onde magnetiche rivoluzioneranno la nostra conoscenza dell'Universo.

Si potrebbe affermare che la nostra conoscenza attuale dell'Universo basata sulle informazioni elettromagnetiche è talmente completa rispetto a quella degli anni Trenta basata sulle informazioni ottiche che una rivoluzione fondata sulle onde gravitazionali sarà molto meno spettacolare di quella avvenuta grazie alle onde radio e ai raggi X. Ciò mi sembra improbabile. Sono dolorosamente consapevole della nostra ignoranza quando contemplo lo stato miserevole delle stime attuali delle onde gravitazionali che lambiscono la Terra. Relativamente a ogni tipo di sorgente di onde gravitazionali che si è cercato di immaginare, con l'eccezione delle stelle binarie e della loro coalescenza, esiste un'incertezza di vari fattori pari a 10 relativamente all'intensità delle onde emesse a una data distanza dalla Terra, o al tasso di presenza del tipo di sorgente in questione (e quindi anche alla distanza da quella più vicina), oppure è l'esistenza stessa della sorgente a essere incerta.

Queste incertezze provocano grande frustrazione a livello della pianificazione e progettazione dei rilevatori di onde gravitazionali. Questo è il lato

negativo. Quello positivo è che, se e quando, infine, le onde gravitazionali verranno rilevate e studiate, potremmo essere ricompensati con delle grandi sorprese.

Nel 1976 non ero ancora diventato pessimista rispetto ai rilevatori a sbarre. Al contrario, ero molto ottimista. La prima generazione di rilevatori a sbarre era da poco entrata in uso e stava funzionando con una sensibilità notevole rispetto a quella che ci si sarebbe potuti aspettare; Braginsky e altri avevano escogitato molte idee promettenti per ottenere in futuro cospicui miglioramenti; e io e altri ci stavamo appena rendendo conto che le onde gravitazionali potevano rivoluzionare la nostra conoscenza dell'Universo.

Il mio entusiasmo e il mio ottimismo mi portarono, una sera di novembre del 1976, a vagare fino a tarda notte per le strade di Pasadena chiedendomi se proporre al Caltech di istituire un programma per rilevare le onde gravitazionali. Gli argomenti a favore erano ovvi: per la scienza in generale un enorme guadagno intellettuale, se il progetto avesse avuto successo; per il Caltech l'opportunità di entrare in un settore nuovo ed eccitante; per me, la possibilità di disporre di un'équipe di sperimentatori presso la mia istituzione madre e di interagire con essi invece di affidarmi principalmente a Braginsky e alla sua équipe dall'altra parte del mondo, e la possibilità di svolgere un ruolo più centrale che non spostandomi a Mosca (e tra l'altro di divertirmi di più). Anche i contro erano ovvi. Il progetto era rischioso; per avere successo avrebbe avuto bisogno di ampie risorse da parte del Caltech e della U.S. National Science Foundation e di una enorme quantità di tempo e di energie da parte mia e di altri; e dopo tutti questi investimenti, poteva anche fallire. Era molto più rischioso rispetto all'entrata del Caltech nella radioastronomia ventitré anni prima (capitolo IX).

Dopo molte ore di riflessione, il fascino esercitato dai possibili risultati ebbe la meglio. E dopo diversi mesi passati a studiare i rischi e i vantaggi, i fisici e gli astronomi e l'amministrazione del Caltech approvarono all'unanimità la mia proposta, ma a due condizioni. Dovevamo trovare un eccellente fisico sperimentale che dirigesse il progetto, e il progetto avrebbe dovuto essere di dimensioni e durata abbastanza grandi da avere buone probabilità di successo. Ciò significava, ritenevamo, un impegno molto più duraturo e intenso di quello di Weber all'Università del Maryland o di quello di Braginsky a Mosca, o degli altri progetti relativi alle onde gravitazionali in corso all'epoca.

Il primo passo era trovare un leader. Volai a Mosca per chiedere consiglio a Braginsky e vedere cosa pensava dell'ipotesi di assumere lui l'incarico. La

mia proposta suscitò in lui reazioni contrastanti. Era combattuto tra la tecnologia molto più avanzata che avrebbe avuto a disposizione in America e la maggiore abilità dei tecnici a Mosca (ad esempio, la complessa soffiatura del vetro era un'arte praticamente scomparsa in America, ma non a Mosca). Era combattuto tra la necessità di costruire un progetto da zero in America e gli ostacoli assurdi che l'inefficiente e burocratico sistema sovietico continuava a frapporre al suo progetto a Mosca. Era combattuto tra la lealtà e l'irritazione verso il suo Paese natale, e tra i sentimenti che da un lato lo portavano a considerare una barbarie il modo in cui in America venivano trattati i poveri e la mancanza di un sistema universale di assistenza sanitaria, e che dall'altro gli facevano considerare la vita a Mosca come detestabile a causa del potere di cui disponevano dei funzionari incompetenti. Era combattuto tra la libertà e la ricchezza dell'America e le ritorsioni del KGB verso familiari e amici e forse anche verso di lui, nel caso avesse «disertato». Alla fine, rifiutò e raccomandò invece Ronald Drever dell'Università di Glasgow.

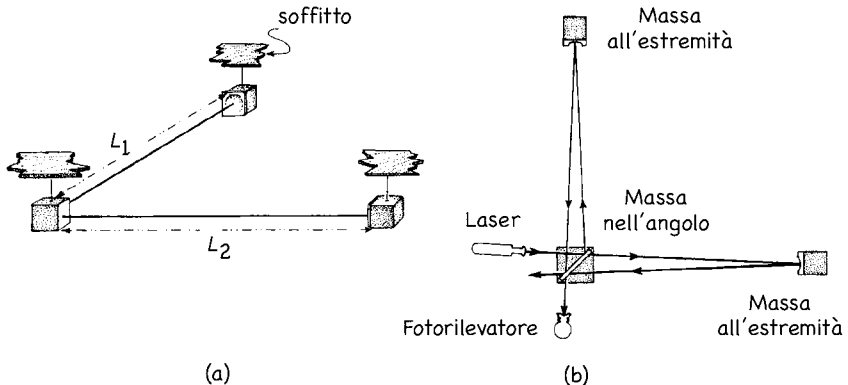
Anche gli altri che consultai erano entusiasti di Drever. Come Braginsky era estremamente creativo, inventivo e caparbio, caratteristiche essenziali per il buon esito del progetto. Il corpo docente e l'amministrazione del Caltech raccolsero tutte le informazioni reperibili su Drever e altri possibili leader, scelsero Drever e lo invitarono a unirsi al Caltech e ad avviare il progetto. Drever, come Braginsky, era combattuto, ma alla fine disse di sì. Eravamo partiti, e di gran carriera.

Avevo immaginato, quando proposi il progetto, che come Weber e Braginsky, il Caltech si sarebbe concentrato sulla costruzione di rilevatori a sbarre. Fortunatamente (visto a posteriori) Drever spinse in una direzione radicalmente diversa. A Glasgow aveva lavorato con i rilevatori a sbarre per cinque anni e ne conosceva i limiti. Molto più promettenti, a suo avviso, erano i rilevatori *interferometrici* di onde gravitazionali (interferometri, per brevità, anche se sono radicalmente diversi dai radiointerferometri del capitolo IX).

Gli interferometri per la rilevazione delle onde gravitazionali erano stati concepiti per la prima volta in una versione primitiva nel 1962 da due amici russi di Braginsky, Mikhail Gertsenshtein e V.I. Pustovoit, e, in maniera indipendente, da Weber nel 1964. Ignaro di queste precoci idee, Rainer Weiss escogitò una versione più matura di rilevatore interferometrico nel 1969, e successivamente, insieme alla sua équipe del MIT, ne progettò e costruì uno nei primi anni Settanta, così come fecero Robert Forward e i suoi colleghi degli Hughes Research Laboratories di Malibu, in California. Il rilevatore di Forward è stato il primo a operare con successo. Alle fine degli anni Settanta

questi rilevatori interferometrici erano diventati una seria alternativa alle sbarre, e Drever aveva apportato il suo sapiente tocco alla loro progettazione.

La figura 10.6 illustra l'idea che sta alla base di un rilevatore interferometrico di onde gravitazionali. Tre masse sono appese mediante cavi a dei supporti all'angolo e alle estremità di una struttura a «L» (figura 10.6a). Quando la prima cresta di un'onda gravitazionale entra nel laboratorio dall'alto o dal basso, le sue forze di marea dovrebbero tendere le masse allontanandole l'una dall'altra lungo un braccio della «L» e comprimerle, al tempo stesso, lungo l'altro braccio. Il risultato sarà un incremento della lunghezza L_1 del primo braccio (ossia della distanza tra le due masse del braccio) e una diminuzione della lunghezza L_2 del secondo braccio: quando la prima cresta dell'onda è passata e arriva la sua prima valle, le direzioni della tensione e della compressione cambiano: L_1 diminuirà e L_2 aumenterà. Monitorando la differenza di lunghezza del braccio, $L_1 - L_2$, è possibile cercare le onde gravitazionali.

La differenza $L_1 - L_2$ viene monitorata con l'*interferometria* (figura 10.6b e scheda 10.3). Un fascio laser viene inviato a un *separatore di fascio* collocato sulla massa nell'angolo. Il separatore riflette metà del fascio e ne trasmette

10.6. – Un rilevatore laser interferometrico di onde gravitazionali. Questo strumento è molto simile a quello utilizzato da Michelson e Morley nel 1887 nella loro indagine sul moto della Terra attraverso l'etere (capitolo I). Si veda il testo per una spiegazione dettagliata.

l'altra metà, dividendolo in due. I due fasci percorrono i due bracci dell'interferometro, rimbalzano su degli specchi collocati sulle masse alle estremità dei bracci e tornano al separatore. Il separatore trasmette metà di ogni fascio e riflette l'altra metà, in tal modo parte della luce di ogni fascio si combina con parte dell'altro e torna indietro verso il laser, e le altre parti dei due fasci si combinano tra loro e vanno al fotorilevatore. Quando non sono presenti onde gravitazionali, gli apporti dei due bracci interferiscono in modo tale (scheda 10.3) che la luce che ne risulta complessivamente va tutta verso il laser, mentre il fotorilevatore non ne riceve affatto. Se un'onda gravitazionale modifica leggermente $L_1 - L_2$, i due fasci percorrono distanze leggermente diverse lungo i due bracci e pertanto interferiranno in modo lievemente diverso; una piccola quantità della loro luce combinata ora raggiungerà il fotorilevatore. Monitorando la quantità di luce che raggiunge il fotorilevatore, si può monitorare la differenza di lunghezza tra i bracci $L_1 - L_2$, e quindi anche le onde gravitazionali.

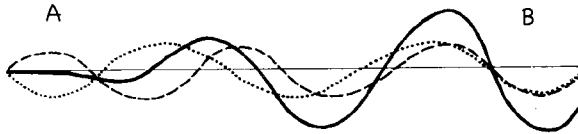
È interessante confrontare un rivelatore a sbarra con un interferometro. Il primo usa le vibrazioni di un unico solido cilindrico per monitorare le forze di marea di un'onda gravitazionale. Il secondo usa i movimenti relativi delle masse appese ai cavi per monitorare le forze di marea.

Il rilevatore a sbarra usa un sensore elettrico (ad esempio, cristalli piezoelettrici compressi dalla sbarra) per monitorare le vibrazioni della sbarra indotte dall'onda. Il rilevatore interferometrico usa fasci di luce che interferiscono tra loro per monitorare i movimenti delle sue masse indotti dalle onde.

La sbarra risponde simpateticamente solo alle onde gravitazionali al di sopra di una stretta banda di frequenze, e pertanto per decifrare la sinfonia delle onde occorrerebbe uno xilofono composto di molte sbarre. Le masse dell'interfometro si muovono avanti e indietro in risposta a onde di *tutte* le frequenze superiori a circa un ciclo al secondo[7], e pertanto l'interferometro possiede una larghezza di banda ampia; tre o quattro interferometri bastano a decifrare l'intera sinfonia.

Rendendo i bracci dell'interferometro un migliaio di volte più lunghi della sbarra (qualche chilometro anziché qualche metro), è possibile rendere le forze di marea delle onde un migliaio di volte più grandi e quindi migliorare la sensibilità dello strumento di un migliaio di volte[8]. La sbarra invece non può essere resa molto più lunga. Una sbarra lunga un chilometro avrebbe una frequenza naturale inferiore a un ciclo al secondo e perciò non funzionerebbe alle frequenze alle quali riteniamo si trovino le sorgenti più interessanti. Inol-

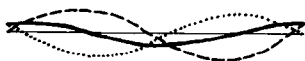
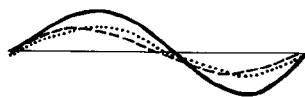
Scheda 10.3
INTERFERENZA E INTERFEROMETRIA

Ogniqualvolta due onde si propagano attraverso la stessa regione dello spazio, si sovrappongono «linearmente» (scheda 10.1), ossia, si sommano. Ad esempio, l'onda punteggiata e l'onda tratteggiata, riportate qui sotto, si sovrappongono e formano la curva a tratto intero:

Si noti che in zone come *A*, dove la valle di un'onda (punteggiata) si sovrappone alla cresta dell'altra (tratteggiata), le onde si annullano, almeno in parte, e producono un'onda totale (a tratto intero) debole o che scompare; mentre in zone come *B*, dove si sovrappongono due valli o due creste, le onde si rafforzano reciprocamente. Si dice che le onde *interferiscono* l'una con l'altra, distruttivamente nel primo caso, costruttivamente nel secondo. Questa sovrapposizione e interferenza avviene in tutti i tipi di onde – onde oceaniche, onde radio, onde luminose, onde gravitazionali – e l'interferenza svolge un ruolo centrale nel funzionamento dei radiointerferometri (capitolo IX) e dei rilevatori interferometrici di onde gravitazionali. Nel rilevatore interferometrico della figura 10.6b, il separatore di fascio sovrappone metà dell'onda luminosa proveniente da un braccio a metà di quella proveniente dall'altro e le invia verso il laser; sovrappone le altre metà e le invia verso il fotorilevatore. Nel caso in cui né un'onda gravitazionale né altre forze abbiano spostato le masse e i loro specchi, le onde

tre, a una frequenza così bassa bisogna lanciare la sbarra nello spazio per isolarla dalle vibrazioni del terreno e dalla gravità fluttuante dell'atmosfera terrestre. Inviare nello spazio una sbarra del genere sarebbe ridicolmente costoso.

Poiché è un migliaio di volte più lungo della sbarra, l'interferometro è un migliaio di volte più immune all'«urto» provocato dal processo di misurazione. Questa immunità significa che l'interferometro non ha bisogno di evi-

luminose sovrapposte assumono le forme seguenti, dove la curva tratteggiata indica l'onda del braccio 1, quella punteggiata l'onda del braccio 2, e quella a tratto intero l'onda totale sovrapposta:

In direzione del fotorilevatore le onde interferiscono in modo perfettamente distruttivo e quindi la curva totale sovrapposta scompare, il che significa che il fotorilevatore non vede nessuna luce. Nel caso in cui un'onda gravitazionale o un'altra forza abbia allungato leggermente un braccio e accorciato leggermente l'altro, il fascio proveniente dall'uno arriva al separatore con un leggero ritardo rispetto al primo e le curve sovrapposte appaiono di conseguenza in questo modo:

L'interferenza distruttiva in direzione del fotorilevatore non è più perfetta; il fotorilevatore riceve della luce. La quantità che ne riceve è proporzionale alla differenza di lunghezza del braccio, $L_1 - L_2$, che a sua volta è proporzionale al segnale dell'onda gravitazionale.

tare l'urto con l'aiuto di un sensore quantistico senza demolizione (difficile da costruire). La sbarra invece può rilevare le onde attese solo se utilizza un sensore quantistico senza demolizione.

Se l'interferometro ha dei vantaggi così grandi rispetto alla sbarra (una larghezza di banda molto maggiore, e una sensibilità potenziale molto superiore) perché Braginsky, Weber e altri non hanno costruito degli interfero-

metri invece delle sbarre? Quando glielo chiesi, a metà degli anni Settanta, Braginsky rispose che i rilevatori a sbarra sono semplici mentre gli interferometri sono orribilmente complessi. Una piccola, intima équipe come la sua a Mosca aveva una ragionevole possibilità di far funzionare i rilevatori a sbarra abbastanza bene da scoprire delle onde gravitazionali. Ma costruire, mettere a punto, e usare con successo dei rilevatori interferometrici richiederebbe un'équipe numerosa e un'ingente quantità di denaro, e Braginsky dubitava che anche con un'équipe e una quantità di fondi del genere a disposizione un rilevatore così complicato potesse avere successo.

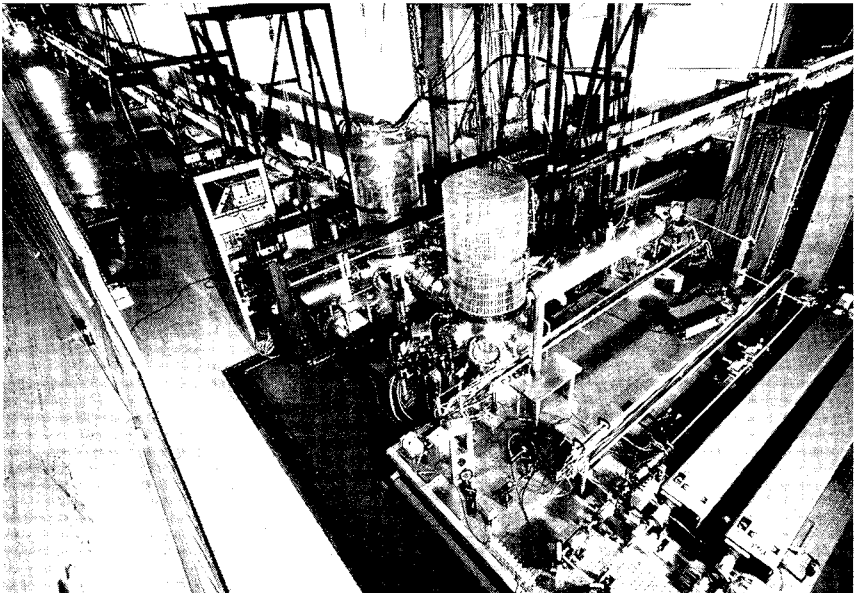
Dieci anni dopo, quando le dolenti prove delle grandi difficoltà che incontravano le sbarre a raggiungere una sensibilità pari a 10^{-21} erano sempre più numerose, Braginsky visitò il Caltech e rimase impressionato dai progressi ottenuti dall'équipe di Drever con gli interferometri, e giunse alla conclusione che dopotutto avrebbero potuto funzionare. Ma l'ampiezza dell'équipe e l'entità dei fondi necessarie per ottenere dei risultati non erano di suo gusto, perciò, una volta tornato a Mosca indirizzò la maggior parte delle attività di ricerca della sua équipe in direzioni diverse dal rilevamento delle onde gravitazionali (altrove nel mondo si continuò a perfezionare le sbarre, il che è una fortuna; esse sono economiche rispetto agli interferometri, al momento sono più sensibili e nel lungo periodo potrebbero svolgere un ruolo speciale per quanto riguarda le onde gravitazionali ad alte frequenze).

In cosa consiste la complessità dei rilevatori interferometrici? Dopotutto, l'idea di base, come descritta nella figura 10.6 sembra ragionevolmente semplice.

In effetti, la figura 10.6 è una grossolana ipersemplificazione perché ignora un numero enorme di ostacoli. I trucchi necessari per evitare questi ostacoli fanno di un interferometro uno strumento molto complesso. Ad esempio, il fascio laser deve puntare esattamente nella direzione giusta, deve avere esattamente la forma e la lunghezza d'onda adatte a entrare perfettamente nell'interferometro, e la sua lunghezza d'onda e intensità non devono fluttuare. Dopo che il fascio è stato diviso in due, i due fasci risultanti devono rimbalzare avanti e indietro lungo i due bracci non una volta sola, come nella figura 10.6, ma molte volte, in modo da aumentare la loro sensibilità ai movimenti oscillatori delle masse; e dopo questi molti rimbalzi, devono reincontrarsi perfettamente nel separatore. Ogni massa deve essere continuamente controllata in modo che i suoi specchi puntino esattamente nelle direzioni giuste e non si girino a causa delle vibrazioni del pavimento, e ciò deve essere fatto

senza mascherare le oscillazioni delle masse indotte dalle onde gravitazionali. Raggiungere la perfezione in tutte queste operazioni, e in molte altre, richiede il monitoraggio continuo di molti diversi componenti dell'interferometro e dei suoi fasci di luce e l'applicazione continua di forze correttive perché continuino a funzionare perfettamente.

Ci si può fare un'idea di queste complicazioni attraverso una fotografia (figura 10.7) di un prototipo di rilevatore interferometrico lungo quaranta metri costruito dall'équipe di Drever al Caltech, un prototipo che è di per sé

10.7 – Il prototipo di rilevatore interferometrico di onde gravitazionali lungo 40 metri realizzato al Caltech, ca.1989. La tavola davanti e la camera a vuoto ingabbiata sulla parte anteriore contengono i laser e i congegni necessari per preparare la luce a entrare nell'interferometro. La massa centrale è alloggiata nella seconda camera a vuoto ingabbiata, quella al di sopra della quale si scorge vagamente un cavo che dondola sospeso. Le masse delle estremità sono lontane 40 metri, in fondo ai due corridoi. I fasci laser dei due bracci passano attraverso il più grande dei due tubi a vuoto che percorrono i corridoi. [Per gentile concessione del LIGO Project, California Institute of Technology].

molto più semplice degli interferometri su scala normale lunghi diversi chilometri necessari per ottenere i risultati sperati.

Durante i primi anni Ottanta quattro équipe di fisici sperimentali si sono affannate a sviluppare strumenti e tecniche per i rilevatori interferometrici: l'équipe di Drever al Caltech, l'équipe che egli aveva fondato a Glasgow (ora diretta da James Hough), quella di Rainer Weiss al MIT, e una fondata da Hans Billing al Max Planck Institut a Monaco, in Germania. Le équipe erano piccole e unite tra loro, e lavoravano più o meno indipendentemente[9], ognuna dedicandosi con il proprio approccio alla progettazione di rilevatori interferometrici. All'interno di ogni équipe i singoli scienziati erano liberi di escogitare nuove idee e perseguirle se lo desideravano e per tutto li tempo che volevano; vigeva un coordinamento molto rilassato. Questo è il clima culturale che gli scienziati inventivi amano e nel quale prosperano, il clima bramato da Braginsky e nel quale i solitari come me si sentono più a loro agio. Ma non è un clima adatto alla progettazione, alla costruzione, alla messa a punto e al funzionamento di strumenti scientifici di grandi dimensioni e complessi come gli interferometri di vari chilometri necessari per ottenere dei risultati.

Progettare nei particolari i molti componenti complessi di questi interferometri, fare in modo che combacino gli uni con gli altri e insieme funzionino adeguatamente, tenere i costi sotto controllo e completare gli interferometri entro un lasso di tempo ragionevole richiede una cultura diversa, basata su uno stretto coordinamento, con sottogruppi di ciascuna équipe che si concentrino su compiti ben definiti e con un unico direttore che decida quali compiti verranno svolti, quando e da chi.

La strada che conduce da un'indipendenza a ruota libera a uno stretto coordinamento è dolorosa. La comunità mondiale dei biologi la sta percorrendo, con grida angosciate che si levano lungo il cammino, mentre procede verso il sequenziamento del genoma umano. E noi fisici delle onde gravitazionali ci siamo messi su quella strada fin dal 1984, con dolore e angoscia non minori. Confido tuttavia nel fatto che l'eccitazione, il piacere e i guadagni in termini scientifici che deriveranno dal rilevamento delle onde e dalla decifrazione delle loro sinfonie faranno un giorno svanire l'angoscia e il dolore nei nostri ricordi.

La prima brusca svolta lungo la nostra dolorosa strada fu il matrimonio forzato che avvenne nel 1984 tra le équipe del Caltech e del MIT, ognuna delle quali era composta all'epoca da otto membri. Richard Isaacson della U.S. Na-

tional Science Foundation (NSF) aveva la pistola in pugno e in cambio del sostegno finanziario dei contribuenti chiedeva una stretta fusione in cui gli scienziati del Caltech e del MIT sviluppassero insieme gli interferometri. Drever (che faceva resistenza con tutte le sue forze) e Weiss (che accettava volenterosamente l'inevitabile) si promisero in matrimonio e io diventai il consulente matrimoniale, l'uomo incaricato di trovare un accordo quando Drever tirava da una parte e Weiss dall'altra. Era un matrimonio instabile, emotivamente defatigante, ma gradualmente cominciammo a lavorare insieme.

La seconda brusca svolta arrivò nel novembre del 1986. Un comitato di eminenti fisici, esperti in tutte le tecnologie per noi necessarie e nell'organizzazione e gestione di progetti scientifici di grandi dimensioni, passò un'intera settimana con noi esaminando minuziosamente i nostri progressi e i nostri piani e poi riferì alla NSF. I nostri progressi ottennero buoni voti, i nostri piani ottennero buoni voti, e le nostre prospettive di successo, ossia di riuscire a rilevare le onde e a decifrarne le sinfonie, vennero considerate altrettanto buone. Ma la nostra mentalità venne considerata pessima, eravamo ancora immersi nella cultura di regole non stringenti e libertà d'azione che vigeva alla nostra nascita, e in quel modo, disse il comitato alla NSF, non avremmo mai ottenuto i risultati sperati. Bisognava sostituire la troika Drever-Weiss-Thorne con un unico direttore, essi affermarono, un direttore capace di plasmare gli individualisti ricchi di talento in una équipe coesa ed efficace, di organizzare il progetto e prendere decisioni sagge e ferme nei momenti cruciali.

La pistola venne sfoderata di nuovo. Se volete continuare con il vostro progetto, ci disse Isaacson della NSF, trovate quel direttore e imparate a lavorare con lui come una squadra di calcio con un bravo allenatore o un'orchestra con un bravo direttore.

Fummo fortunati. Nel bel mezzo della nostra ricerca Robbie Vogt era stato licenziato.

Vogt, un fisico sperimentale brillante e caparbio, aveva diretto progetti volti a costruire e a far funzionare un enorme interferometro astronomico di lunghezza d'onda millimetrica, aveva riorganizzato il settore della ricerca scientifica del Jet Propulsion Laboratory della NASA (che realizza la maggior parte del programma americano di esplorazione planetaria), ed era diventato il soprintendente del Caltech. In quanto tale, pur essendo notevolmente efficiente, Vogt si scontrò duramente con il presidente del Caltech, Marvin Goldberger, sulle modalità di gestione del Caltech, e dopo molti anni di scontri Goldberg lo licenziò. Vogt non era caratterialmente portato a lavorare *sotto* qualcuno quando era profondamente in disaccordo con il suo giudizio, ma

Parte dell'équipe Caltech/MIT di scienziati impegnati nel LIGO alla fine del 1991. *A sinistra*: alcuni membri dell'équipe provenienti dal Caltech, in senso antiorario partendo dall'alto a sinistra: Aaron Gillespie, Fred Raab, Maggie Taylor, Seiji Kawamura, Robbie Vogt, Ronald Drever, Lisa Sievers, Alex Abramovici, Bob Spero, Mike Zucker. *A destra*: alcuni membri dell'équipe provenienti dal MIT, in senso antiorario partendo dall'alto a sinistra: Joe Kovalik, Yaron Hefetz, Nergis Mavalvala, Rainer Weiss, David Schumaker, Joe Giaime [Sinistra: per gentile concessione di Ken Rogers/Black Star; destra: per gentile concessione di Erik L. Simmons].

come capo era fantastico. Lui era il direttore, l'allenatore di cui avevamo bisogno. Se c'era qualcuno che poteva fare di noi un'équipe strettamente coesa, quello era lui.

«Sarà dura lavorare con Robbie», ci disse uno che aveva lavorato con lui al progetto dell'interferometro. «Ne uscirete pieni di lividi e di graffi, ma ne sarà valsa la pena. Il vostro progetto riuscirà».

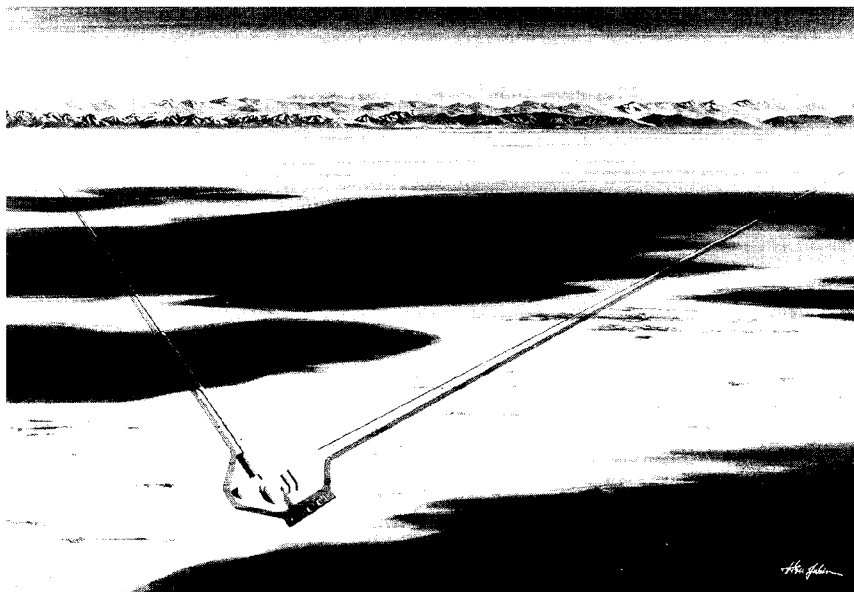
Per diversi mesi Drever, Weiss, io e altri insistemmo affinché Vogt assumesse la direzione. Alla fine egli accettò e, come era nelle attese, sei anni dopo la nostra équipe Caltech/MIT è piena di lividi e di graffi, ma efficace,

energica, coesa e in rapida crescita verso le dimensioni critiche (circa cinquanta tra scienziati e ingegneri) richieste per il successo. Ma il successo non dipende solo da noi. Secondo il piano di Vogt, dei contributi importanti per il nostro progetto verranno anche da altri scienziati[10] che, non essendo strettamente associati a noi, possono mantenere lo stile individualistico e da battitori liberi che noi ci siamo lasciati alle spalle.

Un elemento chiave per il successo della nostra impresa sarà la creazione e l'entrata in funzione di un impianto scientifico nazionale chiamato *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, o LIGO. Il LIGO consisterà in due sistemi a vuoto a forma di L, uno nei pressi di Hanford, Washington, e l'altro nei pressi di Livingstone, in Louisiana in cui i fisici svilupperanno e metteranno in funzione numerose generazioni successive di interferometri sempre più perfezionati; si veda la figura 10.8.

Perché due impianti invece di uno? Perché i rilevatori di onde gravitazionali legati alla Terra hanno sempre interpretato male i rumori simili al crepitare delle onde gravitazionali; ad esempio, il cavo al quale è sospesa una delle masse può scricchiolare leggermente senza una ragione apparente scuotendo la massa e simulando la forza di marea di un'onda. Tuttavia, tale rumore non si verifica quasi mai simultaneamente in due rilevatori indipendenti e molto lontani tra loro. Perciò, per essere sicuri che un apparente segnale sia dovuto a onde gravitazionali, anziché a un rumore, occorre verificare che si produca in due di questi rilevatori. Con un solo rilevatore le onde gravitazionali non possono essere rilevate e monitorate.

Sebbene due impianti siano sufficienti per rilevare un'onda gravitazionale, se ne richiedono almeno tre e preferibilmente quattro, ubicati in siti ben distanti tra loro, per decifrare la sinfonia di un'onda, ossia estrarne tutte le informazioni che trasporta. Un'équipe franco-italiana costruirà un terzo impianto, chiamato VIRGO[11], vicino Pisa. VIRGO e LIGO assieme formeranno una rete internazionale che cercherà di estrarre dalle onde tutte le informazioni possibili. Altre équipe in Inghilterra, Germania, Giappone e Australia stanno cercando fondi per costruire ulteriori impianti e ampliare la rete.

Potrebbe sembrare temerario costruire una rete così ambiziosa per un tipo di onda che nessuno ha mai visto. In realtà non lo è affatto. L'esistenza delle onde gravitazionali è già stata dimostrata dalle osservazioni astronomiche per le quali Joseph Taylor e Russell Hulse della Pinceton University hanno vinto il premio Nobel nel 1993. Taylor e Hulse, usando un radiotelescopio, hanno scoperto due stelle di neutroni, una delle quali è una pulsar, che

10.8 – Raffigurazione artistica del sistema a vuoto a forma di L del LIGO e dell'impianto sperimentale collocato nell'angolo della L, nei pressi di Hanford, Washington [per gentile concessione del LIGO Project, California Institute of Technology].

orbitano l'una intorno all'altra ogni otto ore. Attraverso radiomisurazioni di mirabile precisione hanno verificato che le stelle si muovono insieme tracciando una spirale esattamente al tasso (2,7 parti su un miliardo all'anno) previsto dalle leggi di Einstein, dovuto al fatto di venire continuamente urtate dalle onde gravitazionali che emettono nell'Universo. Nient'altro, solo i leggeri urti delle onde gravitazionali possono spiegare la spirale a rientrare seguita dalle stelle.

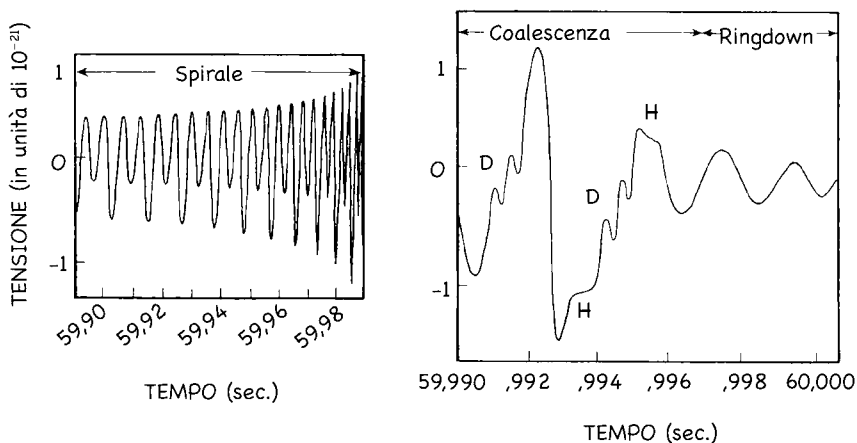
Come sarà l'astronomia basata sulle onde gravitazionali nei primi anni 2000? Il seguente scenario appare plausibile.

Nel 2007 otto interferometri lunghi ognuno diversi chilometri sono in funzione a tempo pieno, ed esplorano i cieli alla ricerca delle onde gravitazionali in arrivo. Due sono attivi nell'impianto a vuoto di Pisa, due si trovano a Livingston, in Louisiana, nel sudest degli Stati Uniti, due a Hanford, Washing-

ton, nel nordovest degli Stati Uniti, e due in Giappone. Dei due interferometri presenti in ogni sito, uno è una «bestia da soma», lo strumento che monitora le oscillazioni di un'onda tra circa 10 e 1000 cicli al secondo, l'altro, sviluppato e installato solo di recente, è un interferometro «specializzato», avanzato, che si concentra sulle oscillazioni tra 1000 e 3000 cicli al secondo.

Una serie di onde gravitazionali irrompe nel Sistema Solare da una remota sorgente cosmica. Ogni cresta dell'onda colpisce per primo il rilevatore giapponese, poi si estende attraverso la Terra fino ai rilevatori di Washington, poi a quelli della Louisiana e infine a quelli in Italia. Per circa un minuto creste e valli dell'onda si susseguono. Le masse in ogni rilevatore oscillano leggermente, perturbando i loro fasci laser e, di conseguenza, la luce che entra nel fotodiodo del rilevatore. I risultati degli otto fotodiodi vengono trasmessi via satellite a un computer centrale che avvisa un'équipe di scienziati che un'altra esplosione di onde gravitazionali della durata di un minuto ha raggiunto la Terra, la terza questa settimana. Il computer combina i risultati degli otto rilevatori per produrre quattro cose: un'ubicazione di massima della sorgente dell'esplosione nel cielo; un campo d'errore relativo a questa ubicazione di massima; e due forme d'onda, due curve oscillanti analoghe alla curva oscillante che si ottiene esaminando i suoni di una sinfonia con un oscilloscopio. La storia della sorgente è cifrata in queste forme d'onda (figura 10.9). Le forme d'onda sono due perché un'onda gravitazionale ha due *polarizzazioni*. Se l'onda viaggia verticalmente attraverso un interferometro, una polarizzazione descrive le forze di marea che oscillano in direzione est-ovest e nord-sud; l'altra descrive le forze di marea che oscillano in direzione nordest-sudovest e nordovest-sudest. Ogni rilevatore, con il suo orientamento, avverte qualche combinazione di queste due polarizzazioni, e dai risultati degli otto rilevatori il computer ricostruisce le due forme d'onda.

Il computer poi confronta le forme d'onda con quelle contenute in un grande catalogo, in modo simile a quello con cui chi osserva gli uccelli li riconosce confrontandoli con le immagini riportate in un libro. Il catalogo è stato redatto mediante simulazioni di sorgenti al computer e grazie all'esperienza dei precedenti cinque anni passati a monitorare onde gravitazionali provenienti da buchi neri che collidono e si fondono, da stelle di neutroni che collidono e si fondono, da stelle di neutroni ruotanti (pulsar) e da esplosioni di supernovae. L'individuazione di questa esplosione è facile (altre, come quelle delle supernovae, sono molto più difficili). Le forme d'onda mostrano l'inequivocabile segnale di due buchi neri che si fondono.

Le forme d'onda presentano tre segmenti:

10.9 – Una delle due forme d'onda prodotte dalla fusione di due buchi neri. L'onda è indicata verticalmente in unità di 10^{-21}; il tempo è indicato orizzontalmente in secondi. Il primo grafico mostra soltanto l'ultimo 0,1 secondo del tratto a spirale verso l'interno della forma d'onda; il minuto precedente della forma d'onda è simile, con ampiezza e frequenza gradualmente crescenti. Il secondo grafico mostra l'ultimo 0,01 secondo, su una scala ampliata. Si è arrivati a conoscere il segmento *a spirale* e quello del *ringdown* nel 1993, attraverso soluzioni delle equazioni di campo di Einstein. Il segmento della coalescenza è del tutto sconosciuto (la curva indicata è frutto della mia fantasia); in futuro le simulazioni effettuate con i supercalcolatori cercheranno di calcolarlo. Nel testo si presume che tali simulazioni abbiano avuto successo agli inizi del XXI secolo.

• il primo segmento lungo un minuto (del quale la figura 10.9 riporta solo l'ultimo 0,1 secondo) presenta oscillazioni dell'intensità che crescono gradualmente in ampiezza e frequenza; queste sono esattamente le forme d'onda che ci si aspetta dal movimento a spirale verso l'interno di due oggetti in un'orbita binaria. Il fatto che si alternino onde più piccole e più ampie indica che l'orbita è piuttosto ellittica anziché circolare;
• il segmento centrale lungo 0,01 secondi combacia quasi perfettamente con le forme d'onda previste dalle recenti (degli inizi del XXI secolo) simulazioni ai supercalcolatori della coalescenza di due buchi neri che si fondono in uno; secondo le simulazioni le gobbe indicate con «H» segnalano il

contatto e la fusione degli orizzonti dei buchi. Le doppie ondulazioni, tuttavia, sono una nuova scoperta, la prima effettuata dai nuovi interferometri specializzati. I vecchi interferometri grezzi non erano mai stati in grado di individuare queste ondulazioni a causa delle loro alte frequenze, e non erano neanche mai state indicate prima da nessuna simulazione al supercalcolatore. La loro spiegazione rappresenta una nuova sfida per i teorici. Esse possono essere i primi indizi di qualche particolare caratteristica in precedenza insospettata delle vibrazioni non lineari della curvatura spaziotemporale dei buchi neri in fase di collisione. I teorici, affascinati da questa prospettiva, riesamineranno le loro simulazioni alla ricerca di segnali di queste coppie di ondulazioni;

- il terzo segmento lungo 0,03 secondi (di cui la figura 10.9 mostra solo l'inizio) consiste di oscillazioni dalla frequenza fissa e di ampiezza gradualmente decrescente. Questa è esattamente la forma d'onda che ci si aspettava da un buco nero che pulsa per scrollarsi di dosso le sue deformazioni, ossia quando vibra come una campana quando viene colpita. La pulsazione consiste in due protrusioni a forma di manubrio che girano continuamente intorno all'equatore del buco e gradualmente si affievoliscono man mano che le increspature della curvatura ne drenano l'energia (figura 10.2).

Dai particolari delle forme d'onda il computer estrae non solo la storia del movimento a spirale, della coalescenza e della vibrazione che va affievolendosi (*ringdown*), ma anche le masse e i tassi di rotazione dei buchi iniziali e del buco finale. Ognuno dei buchi di partenza pesava 25 volte più del Sole e ruotava lentamente. Il buco finale pesa 46 volte più del Sole e ruota al 78% del tasso massimo consentito. L'equivalente di quattro masse solari (2 x 25 – 4 = 46) è stato convertito in increspature della curvatura e trasportato via dalle onde. Ognuno dei buchi di partenza aveva una superficie totale di 136.000 chilometri quadrati. L'area totale della superficie del buco finale è più grande, come richiesto dalla seconda legge della meccanica dei buchi neri (capitolo XII): 144.000 chilometri quadrati. Le forme d'onda rivelano anche la distanza del buco dalla Terra: un miliardo di anni luce, un risultato con un'esattezza all'incirca del 20%. Le forme d'onda ci dicono che dalla Terra stavamo guardando quasi perpendicolarmente al piano dell'orbita, mentre ora stiamo guardando dall'alto il polo nord del buco nero rotante; esse mostrano inoltre che l'orbita dei buchi presentava un'eccentricità (o allungamento) del 30%.

Il computer stabilisce l'ubicazione dei buchi nel cielo in base ai tempi

d'arrivo delle creste dell'onda in Giappone, a Washington e nella Louisiana. Dato che il Giappone è stato il primo a essere colpito, i buchi si trovavano approssimativamente sopra tale Paese e sotto l'America e l'Europa. Un'analisi particolareggiata dei tempi di arrivo fornisce un'ubicazione di massima della sorgente, e un campo di errore intorno all'ubicazione delle dimensioni di un grado. Se i buchi fossero stati più piccoli, le loro forme d'onda avrebbero oscillato più rapidamente e il campo d'errore sarebbe stato più ristretto, ma per questi grandi buchi neri un grado è il risultato migliore che la rete possa ottenere. Tra altri dieci anni, quando sarà in funzione un rilevatore interferometrico sulla Luna, i campi di errore si ridurranno di dimensioni lungo un lato di un fattore 100.

Dato che la loro orbita era allungata, il computer deduce che i due buchi erano entrati in orbita reciproca solo poche ore prima che si fondessero ed emettessero le esplosioni (se avessero orbitato l'uno intorno all'altro per più di qualche ora, la spinta delle onde gravitazionali che partivano dal sistema binario avrebbero reso la loro orbita circolare). La loro cattura recente in quell'orbita significa che i buchi si trovavano probabilmente in un denso ammasso di buchi neri e stelle massive al centro di qualche galassia.

Il computer pertanto esamina i cataloghi delle galassie ottiche, delle radiogalassie e delle galassie a raggi X alla ricerca di tutte quelle che si trovino entro il campo di errore di un grado, a una distanza dalla Terra compresa tra 0,8 e 1,2 miliardi di anni luce, e che abbiano un nucleo particolare. Quaranta candidate vengono individuate e trasmesse agli astronomi. Per i prossimi anni queste quaranta candidate verranno studiate a fondo con radiotelescopi, telescopi millimetrici, a infrarossi, ottici, ultravioletti, raggi X e raggi gamma. Gradualmente apparirà chiaro che una delle galassie candidate ha un nucleo in cui un agglomerato massivo di gas e di stelle stava iniziando, quando la luce che ora vediamo è partita dalla galassia, una fase di violenta evoluzione della durata di un milione di anni, un'evoluzione che darà vita a un buco nero gigante e poi a un quasar. Grazie all'esplosione di onde gravitazionali che hanno segnalato questa galassia come interessante, gli astronomi possono ora cominciare a svelare i particolari della nascita dei buchi neri giganti.

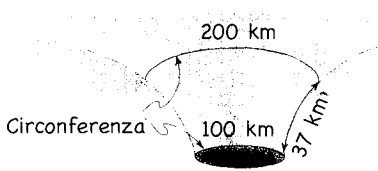
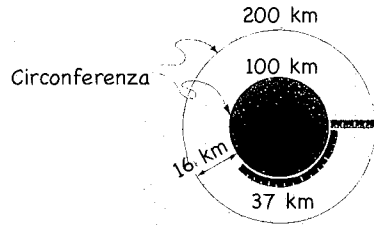
XI. COS'È LA REALTÀ?

Dove lo spaziotempo viene visto curvo la domenica e piatto il lunedì,
e gli orizzonti sono fatti di vuoto la domenica e di pieno il lunedì,
ma gli esperimenti della domenica e quelli del lunedì
concordano in ogni dettaglio

Lo spaziotempo è *davvero* curvo? Non è possibile che lo spaziotempo in realtà sia piatto e che gli orologi e i regoli con cui lo misuriamo e che consideriamo *perfetti* nel senso della scheda 11.1 siano flessibili? Non sarebbe possibile che anche il più perfetto degli orologi accelerasse o rallentasse e che il più perfetto dei regoli si accorciasse o allungasse, mentre ci muoviamo da un punto all'altro e cambiamo il loro orientamento? Queste distorsioni dei nostri orologi e dei nostri regoli non potrebbero far apparire curvo uno spazio che in realtà è piatto?

Sì.

La figura 11.1 illustra un esempio concreto: la misurazione di circonferenze e raggi di un buco nero non rotante. Sulla sinistra è raffigurato un diagramma a incasso relativo allo spazio curvo del buco. Lo spazio è curvo in questo diagramma perché abbiamo scelto di definire le distanze come se i nostri regoli *non* fossero flessibili, come se mantenessero sempre fissa la loro lunghezza a prescindere da dove li collochiamo e da come li orientiamo. I regoli mostrano che l'orizzonte del buco ha una circonferenza di 100 chilometri. Un cerchio che ha il doppio di questa circonferenza, 200 chilometri, è stato tracciato attorno al buco, e la distanza radiale tra l'orizzonte e il cerchio viene misurata con un regolo perfetto; il risultato è 37 chilometri. Se lo spazio fosse piatto, la distanza radiale avrebbe dovuto essere il raggio del cerchio esterno $200/2\pi$ chilometri meno il raggio dell'orizzonte, $100/2\pi$ chilometri; ossia avrebbe dovuto essere $200/2\pi - 100/2\pi = 16$ chilometri (approssimativamente). Per ospitare una distanza radiale molto più grande, 37 chilometri, la superficie deve avere la forma curva, a cono di tromba, indicata nel diagramma.

Se lo spazio fosse in realtà piatto intorno al buco nero, ma i nostri regoli

11.1 – Misurazioni della lunghezza in prossimità di un buco nero da due diversi punti di vista. *A Sinistra*: Lo spaziotempo viene considerato veramente curvo e dei regoli perfetti misurano esattamente le lunghezze dello spaziotempo autentico. *A destra*: lo spaziotempo è considerato veramente piatto e i regoli perfetti sono flessibili. Un regolo perfetto lungo 37 chilometri, quando viene orientato nel senso della circonferenza, misura esattamente le distanze dell'autentico spaziotempo piatto. Tuttavia, se orientato radialmente, subisce uno sprofondamento di entità tanto maggiore quanto più si avvicina al buco, e pertanto indica lunghezze radiali più grandi di quelle vere (indica 37 chilometri invece dei 16 veri nel caso raffigurato).

fossero flessibili e quindi ci ingannassero facendoci credere che lo spazio sia curvo, la vera geometria dello spazio dovrebbe essere quella indicata nella parte destra della figura 11.1, e la vera distanza tra l'orizzonte e il cerchio dovrebbe essere di 16 chilometri, come previsto dalle leggi della geometria piatta di Euclide. Tuttavia, la relatività afferma che i nostri regoli perfetti non misurano questa vera distanza. Prendete un regolo e collocatelo attorno alla circonferenza del buco appena fuori dell'orizzonte (la linea in neretto con le tacche per misurare le distanze nella parte destra della figura 11.1). Quando viene orientato nel senso della circonferenza come in questo caso, esso misura correttamente la distanza vera. Troncate il regolo alla distanza di 37 chilometri, come mostrato. Esso ora abbraccia il 37% della distanza intorno al buco. Poi girate il regolo in modo da orientarlo in senso radiale (linea retta in neretto con le tacche per misurare le distanze della figura

Scheda 11.1
LA PERFEZIONE DEI REGOLI E DEGLI OROLOGI

Per «orologi perfetti» e «regoli perfetti» intendo, in questo libro, orologi e regoli che sono tali nel senso attribuito al termine dai migliori costruttori al mondo di orologi e regoli: la perfezione va giudicata attraverso il confronto con il comportamento degli atomi e delle molecole.
Più specificamente, gli orologi perfetti devono battere a un ritmo uniforme se comparato alle oscillazioni degli atomi e delle molecole. I migliori orologi atomici del mondo sono progettati per fare esattamente questo. Dato che le oscillazioni degli atomi e delle molecole sono controllate da quella che nei capitoli precedenti ho chiamato «velocità di scorrimento del tempo», ciò significa che gli orologi perfetti misurano la parte «temporale» dello spaziotempo curvo di Einstein.
Le tacche dei regoli perfetti devono avere una spaziatura uniforme e standard rispetto alla lunghezza d'onda della luce emessa da atomi e molecole, ad esempio, spaziature uniformi relative alla «lunghezza d'onda di 21 centimetri» della luce emessa dalle molecole di idrogeno. Ciò equivale a richiedere che quando si tiene un regolo a una determinata temperatura standard fissa (ad esempio zero gradi Celsius), esso contenga sempre lo stesso numero fisso di atomi tra una tacca e l'altra per tutta la sua lunghezza; e questo a sua volta garantisce che un regolo perfetto misuri le lunghezze spaziali dello spaziotermpo curvo di Einstein.
Questo capitolo introduce il concetto di «tempi veri» e di «lunghezze vere». Essi non sono necessariamente i tempi e le lunghezze misurati da orologi e regoli perfetti, ossia, non necessariamente i tempi e le lunghezze basati sugli standard atomici e molecolari, ossia non necessariamente i tempi e le lunghezze contenuti nello spaziotempo di Einstein.

11.1). Quando viene girato, la relatività generale richiede che sprofondi. Quando è orientato radialmente la sua vera lunghezza è sprofondata a 16 chilometri, così andrà esattamente dall'orizzonte al cerchio esterno. Tuttavia, la scala sulla sua superficie sprofondata deve affermare che la sua lunghezza è ancora di 37 chilometri, e pertanto che la distanza tra l'orizzonte e il cerchio è di 37 chilometri. Persone come Einstein, che sono ignare della flessibilità del regolo e credono alla sua misurazione imprecisa, ne deducono

che lo spazio è curvo. Ma persone come voi e me, che si sono accorte della flessibilità dello strumento, sanno che il regolo è sprofondato e che lo spazio in realtà è piatto.

Cosa potrebbe far affondare il regolo quando il suo orientamento cambia? La gravità, naturalmente. Nello spazio piatto della parte destra della figura 11.1 si trova un campo gravitazionale che controlla le dimensioni di particelle elementari, nuclei atomici, atomi, molecole, ogni cosa, e le obbliga ad affondare quando sono disposte in senso radiale. L'entità dello sprofondamento è grande in prossimità di un buco nero e più piccola quando ci si trova più lontani, perché il campo gravitazionale che determina lo sprofondamento è generato dal buco nero, e la sua influenza declina con la distanza.

Il campo gravitazionale da cui dipende lo sprofondamento ha anche altri effetti. Quando un fotone o un'altra particella passa accanto al buco, il campo la attira e ne flette la traiettoria. La traiettoria si piega intorno al buco; viene curvata, come indicano le misurazioni nella geometria del vero spaziotempo piatto del buco. Tuttavia, persone come Einstein, che prendono sul serio le misurazioni dei loro regoli e orologi flessibili, ritengono che il fotone si muova lungo una linea retta attraverso lo spaziotempo curvo.

Qual è l'autentica, genuina verità? Lo spaziotempo è davvero piatto come suggeriscono i paragrafi precedenti o è davvero curvo? Per un fisico come me si tratta di una questione priva di interesse perché non ha conseguenze fisiche. Entrambi i punti di vista, che lo spaziotempo sia curvo o piatto, forniscono esattamente le stesse previsioni per qualsiasi misurazione effettuata con dei regoli e degli orologi perfetti, e anche (a quanto pare) le stesse previsioni relative a qualsiasi misurazione effettuata con qualsiasi tipo di strumento fisico. Ad esempio, secondo entrambi i punti di vista, la distanza radiale tra l'orizzonte e il cerchio nella figura 11.1, *misurata da un regolo perfetto*, è di 37 chilometri. Essi invece non concordano sul fatto che quella distanza misurata sia la distanza «reale», ma si tratta di una questione filosofica, non fisica. Quale punto di vista dica la «verità autentica» è irrilevante ai fini degli esperimenti, è una questione di cui devono discutere i filosofi, non i fisici. Inoltre, i fisici possono usare, e in effetti usano, i due punti di vista in modo intercambiabile quando cercano di dedurre le previsioni della relatività generale.

I processi mentali con cui lavora un fisico teorico sono elegantemente descritti dal concetto di *paradigma* di Thomas Kuhn, che ha ottenuto il Ph.D.

in fisica a Harvard nel 1949 ed è poi diventato un eminente storico e filosofo della scienza, ha introdotto il concetto di paradigma nel suo libro del 1962 intitolato *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, uno dei libri più ricchi di intuizioni che abbia mai letto.

Un paradigma è un insieme completo di strumenti che una comunità di scienziati usa nelle sue ricerche su qualche argomento e per comunicarne i risultati ad altri. Il punto di vista dello spaziotempo curvo nella relatività generale è un paradigma; il punto di vista dello spaziotempo piatto è un altro. Ognuno di questi due paradigmi comprende tre elementi fondamentali: una serie di leggi della fisica formulate matematicamente; un insieme di figure (figure mentali, figure verbali, disegni su carta) che ci permettono di comprendere le leggi e di comunicare tra noi; e una serie di modelli, calcoli e problemi risolti in passato, in libri di testo e articoli scientifici pubblicati, che la comunità degli esperti in campo relativistico ritiene siano e interessanti, e che noi usiamo come modello per i nostri calcoli futuri.

Il *paradigma dello spaziotempo curvo* si basa su tre insiemi di leggi formulate matematicamente: l'equazione di campo di Einstein, che descrive come la materia generi la curvatura dello spaziotempo; le leggi che ci dicono che regoli perfetti e orologi perfetti misurano le lunghezze e i tempi dello spaziotempo curvo di Einstein; e le leggi che ci dicono in che modo la materia e i campi si muovono attraverso lo spaziotempo curvo, ad esempio, quelle che ci dicono che dei corpi in movimento libero si spostano lungo linee rette (geodetiche). Anche il *paradigma dello spaziotempo piatto* si basa su tre serie di leggi: una legge che descrive come la materia, nello spaziotempo piatto, generi il campo gravitazionale; le leggi che descrivono come tale campo controlli lo sprofondamento dei regoli perfetti e la dilatazione dell'intervallo tra un ticchettio e l'altro degli orologi perfetti; e le leggi che descrivono come il campo gravitazionale controlli i movimenti di particelle e campi attraverso lo spaziotempo piatto.

Le figure nel paradigma dello spaziotempo curvo comprendono i diagrammi a incasso riportati in questo libro (ad esempio, la parte sinistra della figura 11.1) e le descrizioni verbali della curvatura dello spaziotempo intorno ai buchi neri (ad esempio, il vortice simile a un tornado intorno a un buco nero rotante). Le figure nel paradigma dello spaziotempo piatto comprendono la parte destra della figura 11.1, con il regolo che sprofonda quando passa dall'orientamento nel senso della circonferenza a quello in senso radiale, e la descrizione verbale di «un campo gravitazionale che controlla lo sprofondamento dei regoli».

I modelli del paradigma dello spaziotempo curvo comprendono il calcolo, che si trova nella maggior parte dei libri di testo sulla relatività, da cui si può derivare la soluzione di Schwarzschild dell'equazione di campo di Einstein, e i calcoli mediante i quali Israel, Carter, Hawking e altri hanno dedotto che un buco nero non ha «peli». I modelli dello spaziotempo piatto comprendono i calcoli riportati dai libri di testo relativi a come la massa di un buco nero o di un altro corpo cambi quando le onde gravitazionali vengono catturate da esso, e i calcoli effettuati da Clifford Will, Thibauld Damour e altri, relativi al modo in cui le stelle di neutroni che orbitano l'una intorno all'altra generano onde gravitazionali (onde del campo che provoca lo sprofondamento).

Ogni elemento di un paradigma, le sue leggi, le sue figure e i suoi modelli, è cruciale per i miei stessi processi mentali quando mi dedico alla ricerca. Le figure (mentali e verbali, nonché quelle su carta) agiscono come una bussola generale. Mi fanno intuire il modo in cui l'Universo probabilmente si comporta; me ne servo, insieme agli scarabocchi matematici, in cerca di nuove intuizioni interessanti. Se attraverso le figure e gli scarabocchi giungo a una intuizione che vale la pena di approfondire (ad esempio, la congettura del cerchio del capitolo VII) cerco di verificarla o di confutarla attraverso accurati calcoli matematici basati sulle leggi della fisica formulate matematicamente e proprie del paradigma. Strutturo i miei calcoli accurati secondo i modelli del paradigma. Essi mi dicono quale livello di precisione è probabilmente necessario per ottenere dei risultati affidabili (se la precisione è troppo scarsa, i risultati possono essere errati; se è troppo elevata, i calcoli potrebbero assorbire inutilmente del tempo prezioso). I modelli mi dicono inoltre quale tipi di trattamento matematico sono probabilmente adatti a guidarmi verso il mio obiettivo attraverso la giungla dei simboli matematici. Anche le figure indirizzano i calcoli; esse mi aiutano a trovare delle scorciatoie e a evitare vicoli ciechi. Se i calcoli verificano, o almeno la rendono plausibile, comunico la mia nuova intuizione agli esperti della relatività mediante un misto di figure e di calcoli, e agli altri, come ai lettori di questo libro, solo attraverso figure, cioè figure verbali e disegni.

Le leggi della fisica proprie del paradigma dello spaziotempo piatto possono essere derivate, matematicamente, dalle leggi del paradigma dello spaziotempo curvo, e viceversa. Ciò significa che i due insiemi di leggi sono differenti *rappresentazioni matematiche* degli stessi fenomeni fisici, più o meno nello stesso senso in cui 0,001 e 1⁄1000 sono differenti rappresentazioni matematiche dello stesso numero. Tuttavia, le formule matematiche relative alle

leggi assumono aspetti molto diversi nelle due rappresentazioni, e le figure e i modelli che accompagnano i due insiemi di leggi appaiono molto differenti.

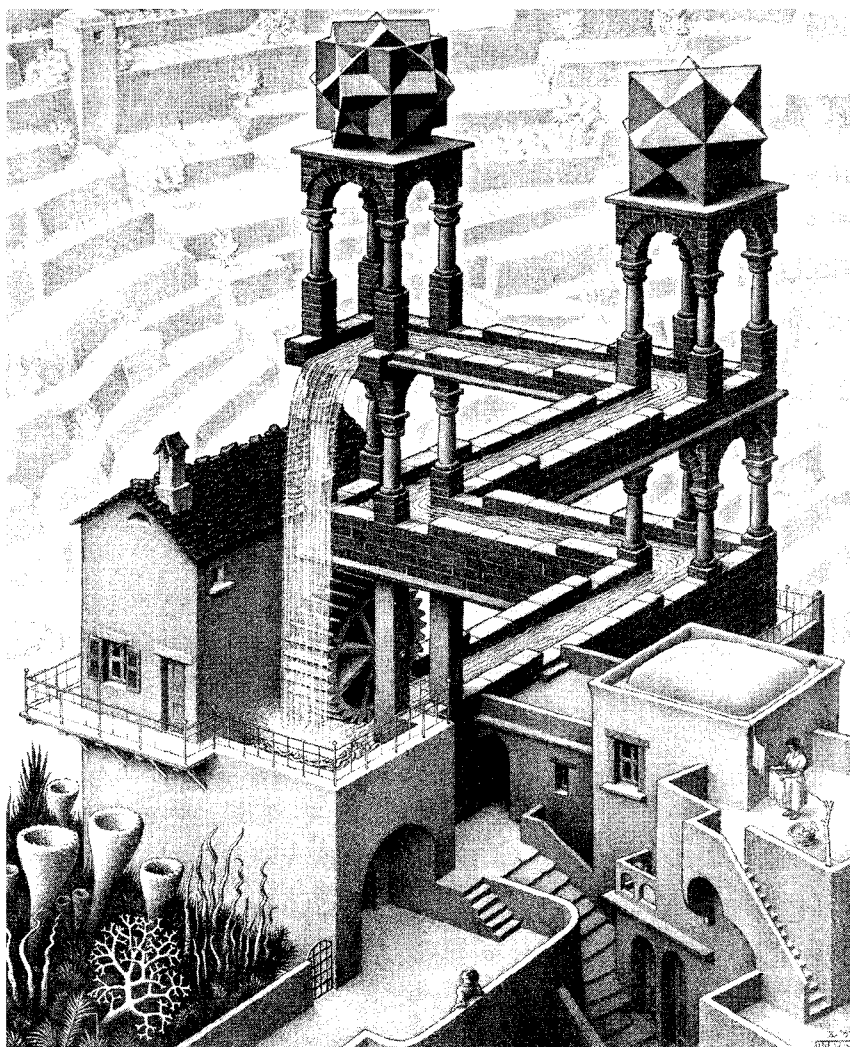
Ad esempio, nel paradigma dello spazio curvo la figura verbale dell'equazione di campo di Einstein è l'affermazione secondo cui «la massa genera la curvatura dello spaziotempo». Tradotta nel linguaggio del paradigma dello spaziotempo piatto, questa equazione di campo è descritta dalla figura verbale «la massa genera il campo gravitazionale che governa lo sprofondamento dei regoli e la dilatazione del ticchettio degli orologi». Sebbene le due versioni dell'equazione di campo di Einstein siano matematicamente equivalenti, le loro figure verbali differiscono profondamente.

È estremamente utile, nella ricerca nel campo della relatività, disporre di entrambi i paradigmi. Alcuni problemi si risolvono più facilmente e rapidamente usando il paradigma dello spaziotempo curvo; altri usando quello dello spaziotempo piatto. I problemi relativi ai buchi neri (ad esempio, la scoperta che non hanno peli) sono più adatti alle tecniche dello spaziotempo curvo; i problemi relativi alle onde gravitazionali (ad esempio, calcolare le onde che si producono quando due stelle di neutroni orbitano l'una intorno all'altra) sono più adatti alle tecniche dello spaziotempo piatto. I fisici teorici, maturando, sviluppano gradualmente la capacità di intuire quale paradigma si adatta meglio a una determinata situazione e imparano a saltare mentalmente dall'uno all'altro quando occorre. Essi possono considerare lo spaziotempo curvo la domenica, mentre pensano ai buchi neri, e piatto il lunedì, quando pensano alle onde gravitazionali. Questo salto mentale è simile a quello che si sperimenta, ad esempio, osservando i disegni di M.C. Escher; si veda la figura 11.2.

Poiché le leggi che stanno alla base dei due paradigmi sono matematicamente equivalenti, possiamo essere sicuri che quando la stessa situazione fisica viene analizzata in base a entrambi i paradigmi, le previsioni circa i risultati degli esperimenti saranno perfettamente identiche. Siamo pertanto liberi di usare il paradigma più adatto a ogni determinata situazione.

Questa libertà conferisce potere. Questo è il motivo per cui i fisici insoddisfatti del paradigma dello spaziotempo curvo di Einstein hanno elaborato, come supplemento, il paradigma dello spaziotempo piatto.

La descrizione di Newton della gravità è un altro paradigma ancora. Esso considera lo spazio e il tempo assoluti, e la gravità come una forza, che agisce istantaneamente tra due corpi («azione a distanza», capitoli I e II).

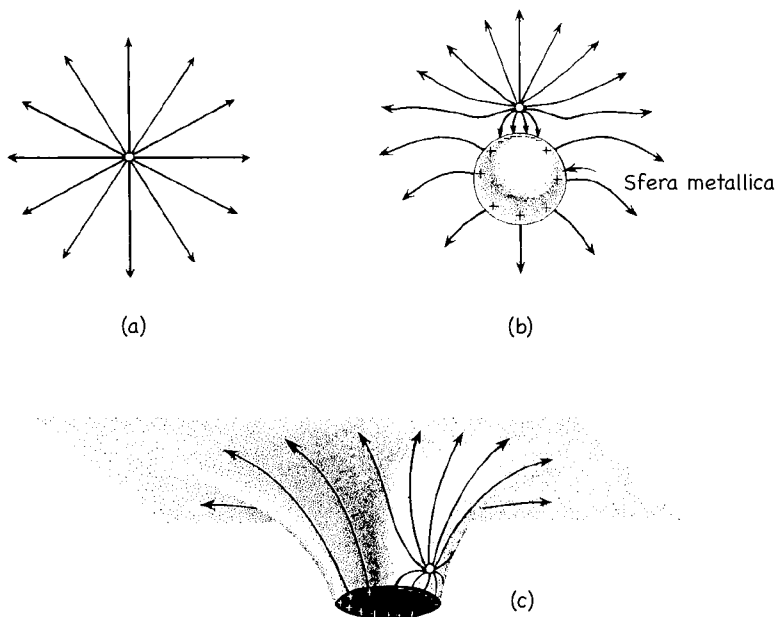
Questo paradigma newtoniamo relativo alla gravità, ovviamente, non è

11.2 – Un disegno di M.C. Escher. Si può sperimentare un salto mentale guardando il disegno prima da un punto di vista (ad esempio, con il flusso dell'acqua alla stessa altezza della cima della cascata) e poi da un altro (con il flusso dell'acqua all'altezza del fondo della cascata). Questo salto mentale è un po' come quello che sperimenta un fisico teorico quando passa dal paradigma dello spaziotempo curvo a quello dello spaziotempo piatto. [© 1961 M.C. Escher Foundation-Baarn-Olanda. Tutti i diritti riservati].

equivalente al paradigma dello spaziotempo curvo di Einstein; essi forniscono previsioni diverse riguardo ai risultati degli esperimenti. Thomas Kuhn usa l'espressione *rivoluzione scientifica* per descrivere lo sforzo intellettuale con cui Einstein ha inventato il suo paradigma e ha convinto i suoi colleghi che offre una descrizione più corretta della gravità di quello di Newton (capitolo II). L'invenzione da parte dei fisici dello spaziotempo piatto non è stata una rivoluzione scientifica nel senso di Kuhn, perché il paradigma dello spaziotempo piatto e quello dello spaziotempo curvo forniscono esattamente le stesse previsioni.

Quando la gravità è debole, le previsioni del paradigma newtoniano e quelle del paradigma dello spaziotempo curvo di Einstein sono quasi identiche e, di conseguenza, i due paradigmi sono molto prossimi a essere matematicamente equivalenti. Pertanto, studiando la gravità nel Sistema Solare, i fisici spesso passano impunemente dal paradigma newtoniano a quello dello spaziotempo curvo a quello dello spaziotempo piatto, usando di volta in volta quello che colpisce di più la loro fantasia o appare loro più promettente[1].

A volte le persone che entrano per la prima volta in un campo della ricerca hanno una mentalità più aperta dei veterani. È quanto accaduto negli anni Settanta quando dei neofiti hanno avuto delle intuizioni che hanno portato a un nuovo paradigma per i buchi neri, il *paradigma della membrana*.

Nel 1971, Richard Hanni, un laureando di Princeton, insieme a Remo Ruffini, un postdoc, osservarono che l'orizzonte di un buco nero può comportarsi in modo simile a una sfera elettricamente conduttiva. Per comprendere questo comportamento particolare si ricordi che una pallina metallica con carica positiva porta con sé un campo elettrico che respinge i protoni ma attira gli elettroni. Il campo elettrico della pallina può essere descritto da linee di campo analoghe a quelle di un campo magnetico. Le linee del campo elettrico puntano nella direzione della forza che il campo esercita su un protone (e in senso opposto, alla forza esercitata su un elettrone), e la densità delle linee del campo è proporzionale all'intensità della forza. Se la pallina è da sola in uno spaziotempo piatto, le sue linee del campo elettrico puntano radialmente verso l'esterno (figura 11.3a). Di conseguenza, la forza elettrica esercitata su un protone punta radialmente lontano dalla pallina, e poiché la densità delle linee di campo diminuisce inversamente al quadrato della distanza dalla pallina, la forza elettrica esercitata su un protone diminuisce a sua volta inversamente al quadrato della distanza.

Si avvicini ora la pallina a una sfera di metallo (figura 11.3b). La superficie

11.3 – (a) Le linee del campo elettrico prodotte da una pallina di metallo con carica positiva in stato di quiete, isolata, in uno spaziotempo piatto. (b) Le linee del campo elettrico quando la pallina è in stato di quiete al di sopra di una sfera di metallo elettricamente conduttiva in uno spaziotempo piatto. Il campo elettrico della pallina polarizza la sfera. (c) Le linee del campo elettrico quando la pallina si trova in stato di quiete al di sopra dell'orizzonte di un buco nero. Il campo elettrico della pallina sembra polarizzare l'orizzonte.

della sfera di metallo è fatta di elettroni che possono muoversi liberamente sulla sfera, e di ioni con carica positiva che non possono. Il campo elettrico della pallina attira un certo numero di elettroni della sfera nelle vicinanze della pallina, lasciando degli ioni in eccesso in qualunque punto della sfera; in altre parole, essa *polarizza* la sfera[2].

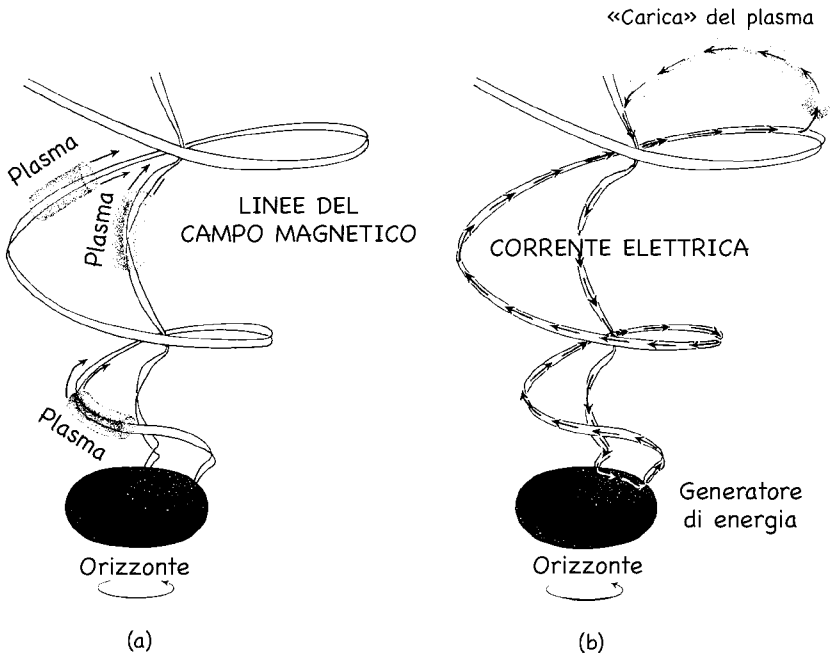
Nel 1971 Hanni e Ruffini, e indipendentemente Robert Wald dell'Università di Princeton e Jeff Cohen del Princeton Institute for Advanced Study, calcolarono le forme delle linee del campo elettrico prodotte da una pallina carica in prossimità dell'orizzonte di un buco nero non rotante. I loro calcoli basati sul paradigma standard dello spaziotempo curvo rivelavano che la

curvatura dello spaziotempo distorce le linee di campo nel modo indicato nella figura 11.3c. Hanni e Ruffini, osservando la somiglianza con le linee di campo della figura 11.3b [guardate il diagramma (c) dal basso, e apparirà quasi uguale al diagramma (b)], ipotizzarono che si possa pensare all'orizzonte di un buco nero nello stesso modo in cui si pensa a una sfera di metallo; ossia, possiamo considerare l'orizzonte come una sottile membrana composta di particelle dotate di carica positiva e negativa, una membrana simile alla sfera di metallo. Normalmente, vi è un numero uguale di particelle positive e negative in ogni punto della membrana, ossia non vi è carica netta in nessuna regione della membrana. Ma quando la pallina viene avvicinata all'orizzonte, le particelle negative in eccesso si spostano nella regione sotto la pallina, lasciando particelle positive in eccesso in ogni altro punto della membrana; in tal modo, la membrana dell'orizzonte si polarizza e l'insieme totale delle linee di campo prodotte dalle cariche della pallina e da quelle dell'orizzonte assume la forma del diagramma (c).

Quando sentii parlare di questa storia, da veterano della teoria della relatività, la trovai ridicola. La relatività generale afferma che se uno cade in un buco nero non troverà nulla all'orizzonte eccetto la curvatura dello spaziotempo. Non vedrà nessuna membrana e nessuna particella carica. Perciò, la descrizione di Hanni e Ruffini del perché le linee del campo elettrico della pallina vengano curvate non può avere alcun fondamento nella realtà. È una pura finzione. La causa della curvatura delle linee di campo, ne ero sicuro, è la curvatura dello spaziotempo e nessun'altra: le linee di campo si piegano in basso verso l'orizzonte nel diagramma (c) unicamente perché è la marea gravitazionale ad attirarle, e non qualche carica polarizzata nell'orizzonte. L'orizzonte non può possedere alcuna carica polarizzata, ne ero sicuro. Ma mi sbagliavo.

Cinque anni dopo, Roger Blandford e un dottorando, Roman Znajek, all'Università di Cambridge, scoprirono che i campi magnetici possono estrarre l'energia rotazionale di un buco nero e usarla per alimentare dei getti (il *processo Blandford-Znajek*, capitolo IX e figura 11.4a). Blandford e Znajek scoprirono anche attraverso calcoli relativi alla curvatura dello spaziotempo che, quando l'energia viene estratta, vi sono delle correnti elettriche che affluiscono nell'orizzonte in prossimità dei poli del buco (sotto forma di particelle a carica positiva che vi precipitano dentro), e altre correnti che defluiscono dall'orizzonte in prossimità dell'equatore (sotto forma di particelle a carica negativa che vi precipitano dentro). Era come se il buco nero facesse parte di un circuito elettrico.

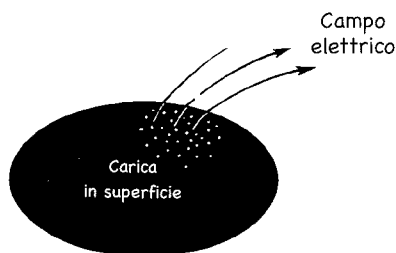
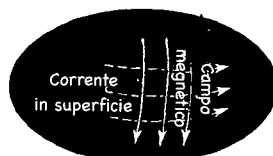
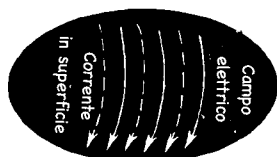
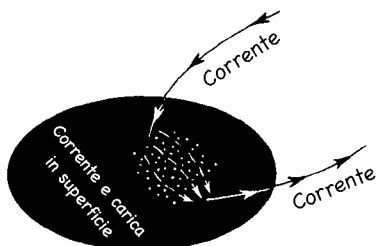
I calcoli, inoltre, mostravano che il buco si comportava come se fosse un generatore di tensione all'interno del circuito (figura 11.4b). Il buco nero generatore di tensione spingeva la corrente fuori dall'equatore dell'orizzonte e su per le linee del campo magnetico a grande distanza dal buco, poi attraverso il plasma (gas ad alta temperatura elettricamente conduttivo) verso altre linee di campo in prossimità dell'asse di rotazione del buco, poi giù per quelle

11.4 – Due punti di vista sul *processo Blandford-Znajek* attraverso il quale un buco nero rotante magnetizzato può produrre dei getti. (a) La rotazione del buco crea un vortice spaziale che obbliga i campi magnetici che attraversano il buco a ruotare. Le forze centrifughe dei campi messi in rotazione accelerano quindi il plasma portandolo ad alte velocità (si veda la figura 9.7d). (b) I campi magnetici e il vortice spaziale insieme generano un grande differenziale di tensione tra i poli del buco e l'equatore; in realtà il buco diventa un generatore di tensione e di energia. La tensione spinge la corrente a scorrere in un circuito. Il circuito trasporta l'energia elettrica dal buco nero al plasma, e l'energia fa accelerare il plasma portandolo ad alte velocità.

linee di campo e dentro l'orizzonte. Le linee del campo magnetico erano i fili del circuito elettrico, il plasma era la carica che estrae energia dal circuito, e il buco rotante era la fonte di energia.

Da questo punto di vista (figura 11.4b) è l'energia trasportata dal circuito che accelera il plasma facendogli formare dei getti. Dal punto di vista del capitolo IX (figura 11.4a) sono le linee del campo magnetico che ruotano, vorticando in continuazione, a far accelerare il plasma. I due punti di vista sono solo modi diversi di guardare alla stessa cosa. L'energia, alla fine, proviene dalla rotazione del buco in entrambi i casi. Pensare che sia trasportata dal circuito o dalle linee di campo che ruotano è una questione di gusti.

La descrizione del circuito elettrico, pur se basata sulla versione standard delle leggi della fisica relative allo spaziotempo curvo, era del tutto inaspettata, e il flusso di corrente attraverso il buco nero – verso l'interno in prossimità dei poli e verso l'esterno in prossimità dell'equatore – appariva del tutto particolare. Durante il 1977 e il 1978 Znajek e, in maniera indipendente, Thibauld Damour (che aveva di recente ottenuto il Ph.D. e lavorava presso l'Observatoire de Paris) si interrogarono su questa peculiarità. Mentre cercavano di comprenderla, indipendentemente l'uno dall'altro, tradussero le equazioni riguardanti lo spaziotempo curvo, che descrivono il buco rotante, il suo plasma e i campi magnetici, in una forma inusuale con un'affascinante interpretazione figurata: la corrente, quando raggiunge l'orizzonte, non entra nel buco. Essa si attacca invece all'orizzonte dove viene trasportata dal tipo di cariche immaginate in precedenza da Hanni e Ruffini. La corrente dell'orizzonte scorre dal polo all'equatore, da dove risale su per le linee del campo magnetico. Inoltre, come scoprirono Damour e Znajek, le leggi che governano la carica e la corrente dell'orizzonte sono eleganti versioni delle leggi dell'elettricità e del magnetismo dello spaziotempo piatto: la legge di Gauss, la legge di Ampère, la legge di Ohm, e la legge di conservazione della carica (figura 11.5).

Damour e Znajek non affermarono che precipitando dentro un buco nero si incontrerà un orizzonte simile a una membrana con cariche e correnti elettriche. Essi affermarono piuttosto che se si desidera immaginare come si comportino l'elettricità, il magnetismo e il plasma al di fuori di un buco nero, è utile considerare l'orizzonte come una membrana dotata di cariche e di correnti.

Quando lessi gli articoli tecnici di Damour e Znajek, a un tratto compresi: essi, e Hanni e Ruffini prima di loro, stavano scoprendo i fondamenti di un nuovo paradigma per i buchi neri. Era un paradigma affascinante, mi cattu-

11.5 – Le leggi che governano la carica e la corrente elettrica sull'orizzonte simile a una membrana di un buco nero. (a) Legge di Gauss: l'orizzonte ha esattamente la giusta quantità di carica in superficie per interrompere tutte le linee del campo elettrico che intersecano l'orizzonte in modo che non si estendano all'interno del buco; si veda la figura 11.3. (b) Legge di Ampère: l'orizzonte ha esattamente la giusta quantità di corrente in superficie per interrompere la parte del campo magnetico parallela all'orizzonte, in modo che non vi sia un campo parallelo al di sotto dell'orizzonte. (c) Legge di Ohm: la corrente in superficie è proporzionale alla parte di campo elettrico tangente alla sua superficie; la proporzionalità costante è una resistività di 377 ohm. (d) Conservazione della carica: nessuna carica si crea o si distrugge; ogni carica positiva che entra nell'orizzonte dall'Universo esterno si attacca all'orizzonte e si muove dentro di esso finché non fuoriesce di nuovo nell'Universo esterno (sotto forma di carica negativa che ricade all'interno per neutralizzare la carica positiva).

rava. Incapace di resistere alla sua attrazione, passai gran parte degli anni Ottanta, insieme a Richard Price, Douglas Macdonald, Ian Redmont, Wai-Mo Suen, Ronald Crowley e altri a perfezionarlo e a scrivere un libro su di esso: *Black Holes: The Membrane Paradigm*.

Le leggi della fisica dei buchi neri, scritte in questo paradigma della membrana, sono del tutto equivalenti alle corrispondenti leggi del paradigma

dello spaziotempo curvo, finché ci si limita a prestare attenzione alla parte esterna del buco. Di conseguenza, i due paradigmi forniscono esattamente le stesse previsioni sui risultati di tutti gli esperimenti o osservazioni che si possano effettuare all'esterno di un buco nero, comprese tutte le osservazioni astronomiche effettuate dalla Terra. Ragionando di astronomia e di astrofisica, trovo utile ricorrere a entrambi i paradigmi, quello della membrana e quello dello spaziotempo curvo, e saltare mentalmente dall'uno all'altro come davanti ai disegni di Escher. Il paradigma dello spaziotempo curvo, con i suoi orizzonti fatti di spaziotempo curvo vuoto, possono essere utili la domenica, quando mi interrogo sulle pulsazioni dei buchi neri. Il paradigma della membrana, con i suoi orizzonti fatti di membrane dotate di carica elettrica, possono essere utili il lunedì, quando mi interrogo sulla produzione di getti da parte dei buchi neri. E dato che è garantito che le previsioni dei due paradigmi saranno identiche, posso usare ogni giorno quello più adatto alle mie necessità.

Non è così all'interno di un buco nero. Cadendo in un buco nero si scoprirà che l'orizzonte non è una membrana dotata di carica, e che all'interno del buco il paradigma della membrana perde completamente di validità. Ma chiunque vi cada dentro pagherà un prezzo per scoprirlo: non potrà pubblicare la sua scoperta sulle riviste scientifiche dell'Universo esterno.

XII. I BUCHI NERI EVAPORANO

Dove l'orizzonte di un buco nero è avvolto da un'atmosfera di radiazioni e particelle calde che evaporano lentamente, e il buco si restringe e infine esplode

I buchi neri crescono

L'Idea balenò in mente a Stephen Hawking una sera di novembre del 1970, mentre si preparava ad andare a letto. Lo colpì con una tale forza che rimase quasi senza fiato. Mai prima di allora un'idea gli era venuta con tale rapidità.

Prepararsi per andare a letto non era una cosa semplice. Hawking è affetto da sclerosi laterale amiotrofica (SLA), una malattia che distrugge gradualmente i nervi che controllano i muscoli del corpo e li lascia cadere in disuso atrofizzandoli uno dopo l'altro. Si muoveva lentamente, barcollando, e infine con una mano si afferrò saldamente a un ripiano o a un montante del letto, si lavò i denti, si infilò a fatica il pigiama e si arrampicò sul letto. Quella sera si muoveva ancora più lentamente del solito, perché la sua mente era presa dall'Idea. Lo eccitava. Era in estasi, ma non lo disse a sua moglie Jane; lo avrebbe messo in cattiva luce perché ci si aspettava che si concentrasse sull'andare a letto.

Rimase sveglio molte ore, quella notte. Non riusciva a dormire. La sua mente continuava a vagare intorno alle ramificazioni dell'Idea, alle sue connessioni con altre cose.

L'Idea era stata messa in moto da una semplice domanda. Quanta radiazione gravitazionale (increspature della curvatura dello spaziotempo) possono produrre due buchi neri quando collidono e si fondono per formare un unico buco nero? Hawking era stato vagamente consapevole per qualche tempo del fatto che il singolo buco nero finale avrebbe dovuto essere più grande, in qualche modo, della «somma» dei due buchi originari, ma in quale senso, e cosa poteva dirgli ciò sulla quantità di radiazione gravitazionale prodotta?

Poi, mentre si preparava ad andare a letto, l'Idea arrivò. All'improvviso una serie di immagini e diagrammi si fusero nella sua mente per produrla: era l'area dell'orizzonte del buco a diventare più grande. Ne era sicuro; le immagini e i diagrammi si erano fusi in un'inequivocabile prova matematica. A prescindere dalle masse dei due buchi originari (le stesse o molto diverse), dalla loro rotazione (nella stessa direzione o uno in direzione opposta all'altro) e dalla modalità di collisione (frontale o con una determinata angolazione), *l'area dell'orizzonte del buco finale deve sempre essere più grande della somma delle aree degli orizzonti dei buchi originari.* E cosa diceva tutto ciò? Molto, si rese conto Hawking mentre la sua mente spaziava seguendo le ramificazioni di questo *teorema di incremento dell'area.*

Prima di tutto, affinché l'orizzonte del buco finale possa avere un'area vasta, il buco finale deve avere una grande massa (o, in modo equivalente, una grande energia), il che significa che non è stata emessa troppa energia sotto forma di radiazione gravitazionale. Ma «non troppa» era comunque molta. Combinando il nuovo teorema sull'incremento dell'area con un'equazione che descrive la massa di un buco nero in termini di area della sua superficie e di rotazione, Hawking dedusse che almeno il 50% della massa dei due buchi originari potrebbe essere convertita nell'energia delle onde gravitazionali lasciando solo il 50% nella massa del buco finale[1].

Nei mesi che fecero seguito a quella notte insonne di novembre, Hawking si rese conto che vi erano altre ramificazioni. La più importante era forse una nuova risposta alla domanda riguardante il modo di *definire* il concetto di orizzonte di un buco «dinamico», ossia quando vibra violentemente (come dovrebbe fare durante la collisione), o quando cresce rapidamente (come avviene quando viene creato per la prima volta dall'implosione di una stella).

Delle definizioni precise e feconde sono essenziali per la ricerca fisica. Solo dopo aver *definito* l'intervallo assoluto tra due eventi (scheda 2.1), Hermann Minkowski poté dedurre che, pur essendo «relativi», lo spazio e il tempo sono unificati in uno spaziotempo «assoluto». Solo dopo aver *definito* le traiettorie delle particelle in caduta libera come linee rette (figura 2.2), Einstein poté dedurre che lo spaziotempo è curvo (figura 2.5), e quindi elaborare le sue leggi della relatività generale. E solo dopo aver *definito* il concetto di orizzonte di un buco dinamico, Hawking e altri poterono esplorare nei dettagli il modo in cui i buchi neri cambiano quando subiscono una collisione o vengono colpiti da detriti che vi cadono dentro.

Prima del novembre 1970 la maggior parte dei fisici, sotto la guida di Roger Penrose, pensavano all'orizzonte di un buco come al «luogo più esterno

in cui i fotoni che cercano di sfuggire dal buco vengono trascinati indietro dalla gravità». Questa vecchia definizione dell'orizzonte era un vicolo cieco intellettuale, come si rese conto Hawking nei mesi seguenti, e per connotarla come tale le diede un nuovo nome, un po' sprezzante, un nome che le sarebbe rimasto attaccato. La chiamò l'*orizzonte apparente*[2].

L'insoddisfazione di Hawking aveva varie radici. In primo luogo, l'orizzonte apparente è un concetto relativo e non assoluto. La sua ubicazione dipende dal quadro di riferimento dell'osservatore; gli osservatori che stanno cadendo dentro il buco potrebbero vederlo in un'ubicazione diversa da quelli in stato di quiete al di fuori del buco. In secondo luogo, quando la materia cade nel buco, l'orizzonte apparente può saltare improvvisamente, senza preavviso, da un'ubicazione all'altra – un comportamento alquanto bizzarro, che non produce facili intuizioni. In terzo luogo, cosa più importante, l'orizzonte apparente non aveva alcun legame con il lampo di immagini e diagrammi che si erano consolidati e avevano dato luogo alla Nuova Idea di Hawking.

La nuova definizione di orizzonte data da Hawking, invece, era assoluta (la stessa in ogni quadro di riferimento), non relativa, e quindi la chiamò l'*orizzonte assoluto*. Questo orizzonte assoluto è bello, pensò Hawking. Ha una bella definizione. Esso è «il confine nello spaziotempo tra gli eventi (esterni all'orizzonte) che possono inviare segnali all'Universo distante e quelli (all'interno dell'orizzonte) che non possono». E ha una bella evoluzione: quando un buco ingoia materia o collide con un altro buco o non fa assolutamente nulla, il suo orizzonte assoluto cambia forma e dimensioni in modo omogeneo e continuo, anziché improvvisamente e a salti (scheda 12.1). Aspetto ancor più importante, l'orizzonte assoluto calzava alla perfezione con la Nuova Idea di Hawking.

Hawking riuscì a vedere, tra le immagini e i diagrammi che si consolidavano nella sua mente, che le aree degli orizzonti assoluti (ma non necessariamente degli orizzonti apparenti) dovevano aumentare non solo quando i buchi neri collidono e si fondono, ma anche alla loro nascita, quando la materia o le onde gravitazionali cadono al loro interno, quando la gravità di altri oggetti presenti nell'Universo solleva maree dentro di essi, e quando l'energia rotazionale viene estratta dal vortice dello spazio appena al di fuori del loro orizzonte. In effetti, le aree degli orizzonti assoluti aumenteranno quasi *sempre* e non possono mai diminuire. La ragione fisica è semplice: tutto ciò che un buco nero incontra invia energia al suo interno attraverso il suo orizzonte assoluto, e non c'è modo che una qualsiasi quantità di energia ne fuoriesca.

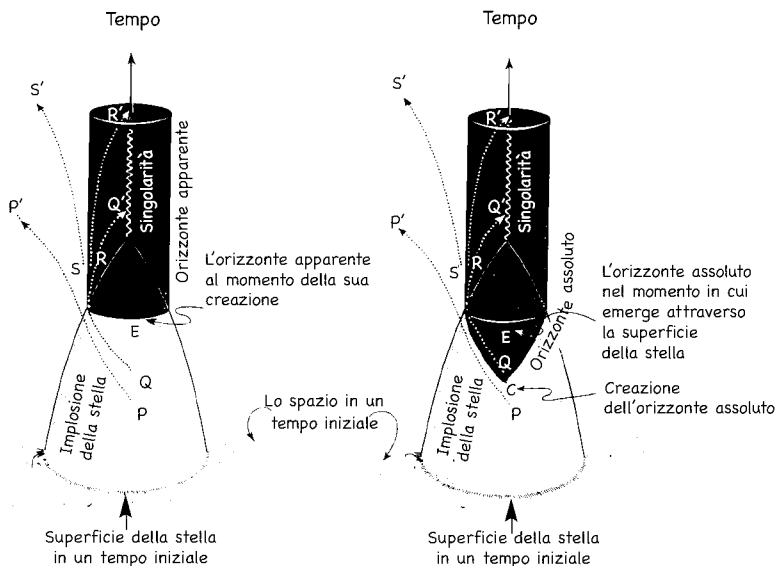
Scheda 12.1

GLI ORIZZONTI ASSOLUTO E APPARENTE
DI UN BUCO NERO DI NUOVA FORMAZIONE

I diagrammi spaziotemporali riportati qui accanto descrivono l'implosione di una stella sferica che dà luogo a un buco nero sferico; si veda la figura 6.7. Le curve punteggiate sono raggi di luce in uscita; in altre parole, esse sono le linee del mondo (traiettorie attraverso lo spaziotempo) dei fotoni, i segnali più veloci che possano essere inviati radialmente all'esterno verso l'Universo distante. Per rappresentare una fuga ottimale si è ipotizzato astrattamente che i fotoni non vengano affatto assorbiti o dispersi dalla materia della stella. L'*orizzonte apparente* (diagramma di sinistra) è il luogo più esterno in cui i fotoni che cercano di sfuggire dal buco vengono trascinati indietro verso la singolarità (ad esempio, i raggi in uscita *QQ'* e *RR'*). L'orizzonte apparente viene creato all'improvviso, completo nelle sue dimensioni, in *E*, dove la superficie della stella si contrae al di sotto della sua circonferenza critica. L'*orizzonte assoluto* (diagramma di destra) è il confine tra gli eventi che possono inviare segnali (ad esempio, gli eventi *P* e *S* che inviano segnali lungo i raggi luminosi *PP'* e *SS'*) all'Universo distante e quelli che non possono (ad esempio, *Q* e *R*). L'orizzonte assoluto viene creato al centro della stella, nell'evento indicato con *C*, molto prima che la superficie della stella si contragga oltre la circonferenza critica. L'orizzonte assoluto è solo un

Dato che tutte le forme di energia producono gravità, ciò significa che la gravità del buco viene continuamente rafforzata e, di conseguenza, l'area della sua superficie aumenta continuamente.

La conclusione di Hawking, formulata con maggiore precisione, era la seguente: *in qualsiasi regione dello spazio e in qualsiasi istante del tempo (misurato nel quadro di riferimento di qualsiasi soggetto), per ottenere l'area totale, misurate le aree di tutti gli orizzonti assoluti di tutti i buchi neri e sommatele insieme. Attendete poi a lungo quanto volete e misurate di nuovo le aree di tutti gli orizzonti assoluti e sommatele. Se nessun buco nero si è spostato al di là delle «mura» della vostra regione dello spazio tra una misurazione e l'altra, l'area totale dell'orizzonte non può essere diminuita, e quasi sempre sarà aumentata, almeno di un po'.*

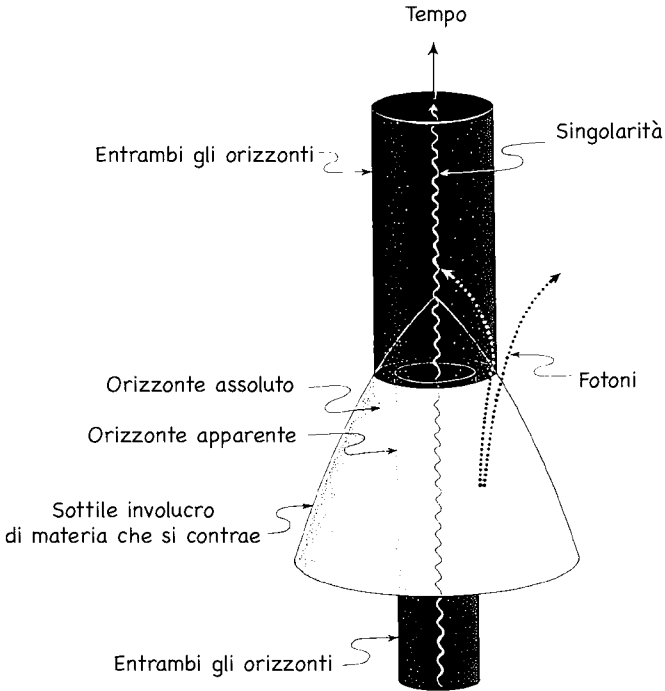
punto quando viene creato, ma poi si espande omogeneamente, come un pallone quando viene gonfiato, ed emerge attraverso la superficie della stella esattamente quando la superficie si contrae oltre la circonferenza critica (il cerchio indicato con *E*). Poi cessa di espandersi, e finisce per coincidere con l'orizzonte apparente sorto all'improvviso.

Hawking era consapevole del fatto che la scelta della definizione dell'orizzonte, assoluto o apparente, non poteva influenzare in alcun modo nessuna previsione riguardante i risultati di esperimenti che gli umani o altri esseri potessero effettuare; ad esempio, non poteva influenzare le previsioni sulle forme d'onda della radiazione gravitazionale prodotta dalle collisioni dei buchi neri (capitolo X), né quelle circa il numero di raggi X emessi dal gas caldo che precipita dentro e attraverso l'orizzonte di un buco nero (capitolo VIII). Tuttavia, la scelta della definizione poteva influire fortemente sulla facilità con cui i fisici teorici deducevano dalle equazioni della relatività generale di Einstein le proprietà e i comportamenti dei buchi neri. La definizione scelta sarebbe diventata uno strumento centrale del paradigma con cui i teorici avrebbero orientato le loro ricerche; avrebbe influenzato le loro immagini

Scheda 12.2

L'EVOLUZIONE DELL'ORIZZONTE APPARENTE E DELL'ORIZZONTE ASSOLUTO IN ESPANSIONE DI UN BUCO NERO

Il diagramma spaziotemporale qui accanto illustra l'evoluzione a salti dell'orizzonte apparente e l'evoluzione teleologica dell'orizzonte assoluto. In un dato momento iniziale di tempo (su un piano orizzontale vicino al fondo del diagramma) un vecchio buco nero non rotante è circondato da un sottile involucro sferico di materia. L'involucro è come la gomma di un palloncino e il buco è come un pozzo al centro di esso. La gravità del buco esercita attrazione sull'involucro (la gomma del palloncino) obbligandolo a contrarsi e infine a essere ingoiato dal buco (il pozzo). L'*orizzonte apparente* (il luogo più esterno in cui i raggi luminosi – indicati con tratto punteggiato – che cercano di fuoriuscire dal buco vengono trascinati indietro) salta vero l'esterno in modo improvviso, discontinuo, nel momento in cui l'involucro che si contrae raggiunge il punto della circonferenza critica del buco finale. L'*orizzonte assoluto* (il confine tra gli eventi che possono e quelli che non possono inviare segnali luminosi all'Universo distante) comincia a espandersi *prima* che il buco inghiottisca l'involucro. Esso si espande *in anticipo* e poi, quando il buco ingoia l'involucro, giunge allo stato di quiete nella stessa ubicazione raggiunta dall'orizzonte apparente con i suoi salti.

mentali, i loro diagrammi, le parole che avrebbero usato per comunicare tra loro e i loro salti intuitivi o la loro comprensione. E a questo scopo, riteneva Hawking, il nuovo orizzonte assoluto, con la sua area che aumentava omogeneamente, sarebbe stato superiore al vecchio orizzonte apparente, con le sue dimensioni caratterizzate da salti discontinui.

Stephen Hawking non era il primo fisico a pensare agli orizzonti assoluti e a scoprire che la loro area aumenta. Roger Penrose a Oxford lo aveva già fatto prima della notte insonne di Hawking. In effetti, le intuizioni di Hawking si basavano in gran parte sulle fondamenta gettate da Penrose (capitolo XIII) e su una recente conversazione avuta con lui. Tuttavia, Penrose non aveva riconosciuto le potenzialità del teorema dell'incremento dell'area e non lo aveva perfezionato né pubblicato. Come mai non ne aveva colto le

potenzialità? Perché non aveva sviluppato un'immagine mentale chiara dell'ubicazione dell'orizzonte assoluto. Non aveva colto quel che Hawking vide con tanta chiarezza nella sua notte insonne. Dopo che i buchi neri collidono, il loro orizzonte assoluto fuso insieme dovrebbe stabilirsi presto in un luogo in stato di quiete, e l'area della sua superficie può essere calcolata a partire dalle equazioni standard relative ai buchi neri quiescenti.

Werner Israel all'Università di Alberta, in Canada, aveva a sua volta colto un barlume del teorema dell'incremento dell'area prima di Hawking, ma, non avendone riconosciuto l'importanza, se ne dimenticò senza pubblicarlo. Inoltre, al contrario di Hawking e Penrose, Israel usava ancora – in realtà ne era ipnotizzato – il vecchio concetto di orizzonte apparente, come tutti noialtri fisici teorici. L'orizzonte apparente aveva svolto un ruolo centrale nella sbalorditiva scoperta fatta da Penrose nel 1964 che le leggi di Einstein

obbligano qualsiasi buco nero ad avere una singolarità al suo centro (capitolo XIII). L'orizzonte apparente aveva in tal modo dimostrato la sua efficacia. Accecati da essa, noi relativisti non potevamo concepire di sostituire l'orizzonte apparente, come definizione della superficie di un buco nero, con l'orizzonte assoluto.

Prestavamo poca attenzione all'orizzonte assoluto anche perché viola il venerato concetto secondo cui un effetto non può precedere la sua causa. Quando la materia cade dentro un buco nero, l'orizzonte assoluto comincia a crescere («effetto») prima che la materia lo raggiunga («causa»). L'orizzonte cresce anticipando il fatto che la materia verrà presto ingoiata e farà aumentare l'attrazione gravitazionale del buco (scheda 12.2). Questo apparente paradosso ha un'origine semplice. La definizione precisa di orizzonte assoluto dipende da ciò che accadrà in futuro: dal fatto che dei segnali fuoriescano o meno verso l'Universo distante. Nella terminologia dei filosofi è una definizione teleologica (una definizione basata sulle «cause finali»), e obbliga l'evoluzione dell'orizzonte a essere teleologica. Dato che i punti di vista teleologici sono stati raramente, per non dire mai, utili nella fisica moderna, l'orizzonte assoluto non sembrava valere la pena di essere esplorato.

Hawking è un pensatore audace. È molto più disposto della maggior parte dei fisici a lanciarsi in direzioni radicalmente nuove, se il «fiuto» gli dice che sono giuste. L'orizzonte assoluto era una di queste, perciò malgrado la sua natura radicale, lo scelse, e fu una scelta feconda. Nel giro di pochi mesi Hawking e James Hartle furono in grado di derivare dalle leggi della relatività generale di Einstein un insieme di eleganti equazioni che descrivono come l'orizzonte assoluto si espanda in modo continuo e omogeneo e cambi forma prima che detriti o onde gravitazionali vengano ingoiati dal buco o prima di essere attratto dalla gravità di altri corpi.

Nel novembre del 1970 Stephen Hawking stava appena cominciando ad affermarsi come fisico. Aveva già compiuto importanti scoperte ma non era ancora una figura dominante. Nel corso di questo capitolo, come vedremo, lo diventerà.

Come ha potuto Hawking, con la sua grave disabilità, superare a livello di ragionamento e di intuizione i suoi principali colleghi e concorrenti, gente come Roger Penrose, Werner Israel e (come vedremo) Yakov Borisovich Zel'dovich? Essi avevano l'uso delle mani, potevano tracciare disegni ed effettuare molte pagine di calcoli sulla carta, calcoli nei quali, lungo il percorso, vengono fissati molti complessi risultati intermedi per poi tornarci sopra,

Stephen Hawking con la moglie Jane e il figlio Timothy a Cambridge, nel 1980. [Fotografia di Kip Thorne].

sceglierli uno a uno e combinarli per ottenere un risultato finale; calcoli che non posso immaginare qualcuno sia in grado di fare nella sua testa. All'inizio degli anni Settanta, le mani di Hawking erano in gran parte paralizzate, non poteva disegnare né scrivere equazioni. La sua ricerca doveva svolgersi interamente nella sua testa.

Poiché la perdita di controllo delle mani procedeva in modo molto graduale, Hawking ha avuto molto tempo per adattarvisi. Egli ha allenato gradualmente la sua mente a pensare in modo diverso da quello degli altri fisici. Egli pensa attraverso nuovi tipi di immagini mentali intuitive e di equazioni mentali con cui ha sostituito i disegni su carta e le equazioni scritte. Le immagini e le equazioni mentali di Hawking si sono rivelate molto più efficaci di quelle su carta per alcuni tipi di problemi e meno per altri, ed egli ha gradualmente imparato a concentrarsi sui problemi nei quali i suoi metodi gli assicurano una maggiore efficacia, un'efficacia che nessun altro è in grado di eguagliare.

La disabilità ha aiutato Hawking in altri modi. Come ha spesso osservato lui stesso, lo ha liberato dalla responsabilità di tenere lezioni per gli studenti all'università, e ha così potuto avere molto più tempo libero per la ricerca dei suoi colleghi sani. Cosa ancor più importante, forse, la malattia ha migliorato il suo atteggiamento verso la vita.

Hawking ha contratto la SLA nel 1963, subito dopo aver iniziato il dottorato all'Università di Cambridge. La SLA è un nome collettivo con cui si indica tutta una varietà di malattie neuromotorie, la maggior parte delle quali uccide abbastanza rapidamente. Pensando di avere solo pochi anni di vita, Hawking all'inizio perse l'entusiasmo per la vita e per la fisica. Ma nell'inverno '64-'65 divenne chiaro che la sua era una rara variante della SLA che mina il controllo del sistema nervoso centrale sui muscoli nel corso di molti anni, non di pochi. All'improvviso, la vita apparve meravigliosa. Egli tornò a dedicarsi alla fisica con più vigore ed entusiasmo di quando era uno studente in buona salute e spensierato, e, forte della proroga di vita ottenuta, sposò Jane Wilde, che aveva conosciuto poco dopo aver contratto la SLA e di cui si era innamorato nelle prime fasi della sua malattia.

Aver sposato Jane fu essenziale per il suo successo e la sua felicità attraverso gli anni Sessanta, Settanta e Ottanta. Jane assicurò loro una casa e una vita normale nel pieno delle avversità fisiche.

Il sorriso più felice che ho visto in vita mia è stato quello di Stephen una sera d'agosto del 1972, sulle Alpi francesi, quando Jane, io e i due figli più grandi degli Hawking, Robert e Lucy, tornammo da una gita in montagna. Per sbadataggine avevamo perso l'ultima seggiovia per tornare a valle ed eravamo stati costretti a coprire a piedi un dislivello di circa mille metri. Sul viso di Stephen, che si era molto preoccupato per il nostro ritardo, si disegnò un enorme sorriso e le lacrime gli spuntarono agli occhi vedendo Jane, Robert e Lucy entrare nel soggiorno dove sedeva svogliatamente davanti alla sua cena.

Hawking perse l'uso degli arti e poi della voce molto gradualmente. Nel giugno del 1965, quando ci incontrammo per la prima volta, camminava con il bastone e la sua voce era solo leggermente tremolante. Nel 1970 aveva bisogno di un tutore a quattro zampe. Nel 1972 era bloccato su una sedia a rotelle motorizzata e aveva in gran parte perso la capacità di scrivere, ma poteva ancora mangiare da solo con una certa facilità e la maggior parte dei madrelingua anglofoni potevano capirlo quando parlava, anche se con difficoltà. Nel 1975 non riusciva più a mangiare da solo e soltanto chi era abituato al suo modo di parlare riusciva a capirlo. Nel 1981 perfino io avevo difficoltà a capirlo se non ci trovavamo in una stanza assolutamente silenziosa; solo chi passava molto tempo con lui riusciva a capirlo senza sforzo. Nel 1985 i suoi polmoni non riuscivano a liberarsi del liquido da soli e dovette sottoporsi a tracheotomia in modo che potessero venire drenati regolarmente mediante aspiramento. Il prezzo era alto: perse del tutto la voce. Per rimediare, acqui-

stò un sintetizzatore vocale gestito da un computer con un accento americano del quale si scusava con imbarazzo. Egli controlla il computer con un semplice interruttore fissato a una mano, che preme mentre un elenco di parole scorre sullo schermo di un computer. Costruisce le sue frasi frugando nell'elenco e pescando le parole una a una. È penosamente lento, ma funziona; non può formulare più di una breve frase al minuto, ma ognuna di esse viene pronunciata chiaramente dal sintetizzatore, e spesso sono delle perle.

Man mano che la sua capacità di parlare si deteriorava, Hawking ha imparato a rendere significativa ogni frase. Egli ha trovato modi per esprimere le sue idee più chiari e sintetici di quelli che usava nei primi anni della sua malattia. Con la chiarezza e la brevità dell'espressione venne una maggiore chiarezza di pensiero, e un più forte impatto sui suoi colleghi, ma anche la tendenza ad apparire oracolare: quando si pronuncia su qualche questione profonda, noi, i suoi colleghi, a volte non sappiamo con certezza, dopo aver riflettuto e calcolato a lungo per conto nostro, se stava solo formulando un'ipotesi o aveva delle prove concrete. A volte non ce lo dice, e di tanto in tanto ci domandiamo se, con le intuizioni assolutamente uniche di cui è capace, non si stia prendendo gioco di noi. Egli dopotutto conserva ancora quel pizzico di malizia che lo aveva reso famoso quando era studente universitario a Oxford, e un senso dell'umorismo che non lo abbandona neanche nelle prove difficili (prima della tracheotomia, quando cominciai ad avere problemi a capire cosa diceva, a volte mi ritrovavo a dover ripetere: «Stephen, continuo a non capire, ripetilo ancora, per piacere». Mostrando un po' di frustrazione ripeteva, finché all'improvviso non lo capivo. Mi stava dicendo una battuta bizzarra e incredibilmente spiritosa. Quando finalmente ci arrivai, fece una smorfia di piacere).

Entropia

Dopo aver celebrato la capacità di Hawking di superare per ragionamento e intuizione i suoi colleghi, devo ora confessare che egli non ci è riuscito *sempre*, solo la maggior parte delle volte. Tra le sue sconfitte, forse la più spettacolare è venuta per mano di un dottorando di John Wheeler, Jacob Bekenstein. Ma in quella sconfitta, come vedremo, Hawking ottenne un trionfo assai più grande: scoprì che i buchi neri possono evaporare. Alla via tortuosa che ha portato a questa scoperta è dedicata gran parte del resto di questo capitolo.

Il campo di battaglia sul quale Hawking venne sconfitto era quello della *termodinamica dei buchi neri*. La termodinamica è l'insieme delle leggi fisiche che governano il comportamento statistico aleatorio di un gran numero di atomi, ad esempio, degli atomi che compongono l'aria di una stanza o quelli che costituiscono il Sole intero. Il comportamento statistico degli atomi comprende, tra le altre cose, le loro oscillazioni aleatorie causate dal calore; e, in maniera corrispondente, le leggi della termodinamica comprendono, tra le altre cose, le leggi che governano il calore. Di qui il nome di *termodinamica*.

Un anno prima che Hawking scoprisse il suo teorema dell'area, Demetrios Christodoulou, un dottorando diciannovenne dell'équipe di Wheeler a Princeton, osservò che le equazioni che descrivono lenti cambiamenti delle proprietà dei buchi neri (ad esempio, quando aggregano lentamente del gas) somigliano ad alcune equazioni della termodinamica. La somiglianza era notevole, ma non c'era ragione di pensare a niente più di una coincidenza.

La somiglianza venne rafforzata dal teorema dell'area di Hawking: esso somigliava molto da vicino alla *seconda legge della termodinamica*. In effetti, il teorema dell'area, così come formulato in precedenza in questo capitolo, diviene la seconda legge della termodinamica se solo sostituiamo l'espressione «aree dell'orizzonte» con il termine «entropia»: *In qualsiasi regione dello spazio e in qualsiasi istante del tempo (misurato nel quadro di riferimento di qualsiasi soggetto), misurate l'entropia totale di qualsiasi cosa vi si trovi. Se nulla si è spostato al di là delle «mura» della vostra regione di spazio tra una misurazione e l'altra, l'entropia totale non può essere diminuita, e quasi sempre sarà aumentata, almeno di un po'.*

Cos'è questa cosa chiamata «entropia» che aumenta? È la quantità di «aleatorietà» nella regione dello spazio prescelta, e l'aumento dell'entropia significa che le cose diventano continuamente sempre più aleatorie.

Detto con maggior precisione (si veda la scheda 12.3), *l'entropia è il logaritmo del numero di modi in cui tutti gli atomi e le molecole presenti nella regione dello spazio che abbiamo prescelto possono essere distribuiti senza modificare l'aspetto macroscopico di tale regione*[3]. Quando vi sono molti possibili modi in cui gli atomi e le molecole possono essere distribuiti, vi è un'enorme quantità di aleatorietà a livello macroscopico e l'entropia è enorme.

La legge dell'aumento dell'entropia (la seconda legge della termodinamica) è molto potente. Ad esempio, supponiamo di avere una stanza contenente aria e qualche giornale accartocciato. L'aria e la carta assieme contengono meno entropia di quanta ne avrebbero se la carta venisse bruciata e trasformata in biossido di carbonio, vapore acqueo e un mucchietto di cenere. In altre parole,

quando la stanza contiene l'aria e la carta originarie, vi sono meno modi in cui le sue molecole possono essere distribuiti aleatoriamente di quando contiene l'aria, il biossido di carbonio, il vapore acqueo e la cenere finali. Ciò accade perché la carta brucia naturalmente se una scintilla le dà fuoco, e perché la combustione non può essere invertita naturalmente e facilmente per ricreare la carta a partire dal biossido di carbonio, dal vapore acqueo, dalla cenere e dall'aria. L'entropia aumenta durante la combustione, e diminuirebbe durante la decombustione; perciò la combustione avviene e la decombustione no.

Stephen Hawking notò immediatamente, nel novembre del 1970, la notevole somiglianza tra la seconda legge della termodinamica e la sua legge dell'aumento dell'area, ma per lui era ovvio che la somiglianza fosse una pura coincidenza. Bisognerebbe essere pazzi o almeno un po' toccati per affermare che l'area dell'orizzonte di un buco nero *è*, in qualche senso, l'entropia del buco, pensava Hawking. Dopotutto, non vi è proprio nulla di aleatorio riguardo a un buco nero. Un buco nero è l'esatto opposto dell'aleatorietà, è l'incarnazione della semplicità. Una volta che un buco nero si è sistemato in uno stato di quiete (attraverso l'emissione di onde gravitazionali; figura 7.4), resta del tutto privo di «peli»: *tutte* le sue proprietà sono determinate esattamente da tre soli numeri, la sua massa, la sua velocità di rotazione e la sua carica elettrica. Il buco non presenta alcun tipo di aleatorietà.

Jacob Bekenstein non ne era persuaso. Gli sembrava probabile che l'area di un buco nero *fosse* in qualche senso profondo la sua entropia, o, più precisamente, la sua entropia moltiplicata per qualche costante. Altrimenti, rifletteva Bekenstein, se i buchi fossero caratterizzati da un'entropia in dissolvenza (nessuna aleatorietà), come sosteneva Hawking, potrebbero venire usati per ridurre l'entropia dell'Universo, violando in tal modo la seconda legge della termodinamica. Tutto ciò che occorre fare è assemblare tutte le molecole di aria di una stanza in un pacchetto e gettarlo dentro un buco nero. Le molecole d'aria e tutta l'entropia in esse contenuta sparirebbero dal nostro Universo nel momento in cui il pacchetto entra nel buco, e se l'entropia del buco non aumenta per compensare questa perdita, l'entropia totale dell'Universo verrebbe ridotta. Questa violazione della seconda legge della termodinamica sarebbe altamente insoddisfacente, sosteneva Bekenstein. Per mantenere la validità della seconda legge, un buco nero *deve* possedere un'entropia che aumenta quando il pacchetto ne attraversa l'orizzonte, e il candidato più promettente per tale entropia, pensava Bekenstein, era l'area della superficie del buco.

Niente affatto, rispondeva Hawking. Si possono perdere le molecole

Scheda 12.3
L'ENTROPIA NELLA STANZA DEI GIOCHI DI UN BAMBINO

Immaginate una stanza quadrata che contenga 20 giocattoli. Il pavimento della stanza è costituito da 100 mattonelle (10 per fila) e un genitore ha riordinato la stanza tirando tutti i giocatoli verso la fila di mattonelle più a nord. Al genitore non importava minimamente quali giocattoli andassero a finire su quale mattonella, per cui essi sono stati tutti gettati alla rinfusa. Una misura della loro aleatorietà è il numero di modi in cui avrebbero potuto atterrare (ognuno dei quali è considerato soddisfacente dal genitore), ossia il numero di modi in cui 20 giocattoli possono distribuirsi sulle 10 mattonelle della fila nord. Questo numero risulta essere 10 x 10 x 10 x… x 10, con un fattore 10 per ogni giocattolo, ossia 10^{20}.
Questo numero, 10^{20}, è una descrizione della quantità di aleatorietà presente nei giocattoli. Tuttavia, è una descrizione ben poco maneggevole, dato che 10^{20} è un numero così grande. Molto più facile da maneggiare è il *logaritmo* di 10^{20}, ossia il numero di fattori di 10 che devono essere moltiplicati insieme per ottenere 10^{20}. Il logaritmo è 20 e *questo logaritmo del numero di modi in cui i giocattoli potrebbero venire sparsi sulle mattonelle è l'entropia dei giocattoli.*
Supponiamo adesso che un bambino entri nella stanza e giochi con i giocattoli tirandoli intorno e abbandonandoli, e poi se ne vada. Il genitore torna e

d'aria gettandole dentro un buco nero e anche l'entropia. Questa è esattamente la natura dei buchi neri. Dobbiamo semplicemente accettare questa violazione della seconda legge della termodinamica, sosteneva Hawking; le proprietà del buco nero lo richiedono, e inoltre ciò non comporta gravi conseguenze. Ad esempio, sebbene in circostanze normali una violazione della seconda legge della termodinamica permetterebbe la costruzione di una macchina a moto perpetuo, quando è un buco nero a provocare tale violazione non è possibile nessuna macchina del genere. La violazione costituisce semplicemente una piccola peculiarità delle leggi della fisica, con la quale queste ultime possono presumibilmente convivere senza problemi.

Bekenstein non ne era convinto.

Tutti gli esperti dei buchi neri del mondo si schierarono dalla parte di

vede tutto quel disordine. Ora i giocattoli sono distribuiti in modo molto più aleatorio di prima. Al genitore non importa dove si trovi ogni giocattolo, tutto quel che gli importa è che siano stati sparpagliati a caso per tutta la stanza. In quanti modi diversi essi possono essere stati sparsi? In quanti modi i 20 giocattoli potrebbero venire distribuiti sulle 100 mattonelle? 100 x 100 x 100 x… x 100, con un fattore di 100 per ogni giocattolo, ossia $100^{20} = 10^{40}$ modi. Il logaritmo di questo numero è 40, quindi il bambino ha fatto aumentare l'entropia dei giocattoli da 20 a 40.

«Ah, ma poi il genitore ha riordinato la stanza e ciò riduce l'entropia di nuovo a 20», potreste pensare. «Questo non viola la seconda legge della termodinamica?». No, affatto. L'entropia dei giocattoli può essere ridotta dall'azione di riordino effettuata dal genitore, ma l'entropia nel corpo di quest'ultimo e nell'aria della stanza è aumentata: ci è voluta un sacco di energia per tirare di nuovo i giocattoli verso le mattonelle più a nord, energia che il genitore si è procurato «bruciando» un po' del grasso del suo corpo. La combustione ha trasformato le molecole ben ordinate del grasso in prodotti residui disorganizzati, ad esempio il biossido di carbonio che il genitore ha espirato aleatoriamente nella stanza; e il risultante aumento dell'entropia nel corpo del genitore e nella stanza (l'aumento del numero di modi in cui i loro atomi e le loro molecole possono essere distribuiti) supera di molto la diminuzione di entropia dei giocattoli.

Hawking, tutti eccetto il mentore di Bekenstein, John Wheeler. «La tua idea è abbastanza folle da poter essere giusta», disse Wheeler a Bekenstein, il quale, così incoraggiato, continuò a scavare e rese più stringente la sua congettura. Egli stimò in quale misura l'entropia di un buco avrebbe dovuto aumentare quando vi veniva gettato dentro un pacchetto di aria, per rispettare la seconda legge della termodinamica, e stimò di quanto il pacchetto che sprofondava avrebbe fatto aumentare l'area dell'orizzonte; da queste stime approssimative egli dedusse poi una relazione fra l'entropia e l'area che, egli riteneva, *avrebbe potuto* rispettare comunque la seconda legge della termodinamica: l'entropia, egli concluse, è approssimativamente l'area dell'orizzonte divisa per una famosa area associata alle (allora non ancora ben comprese) leggi della gravità quantistica, l'area di Planck-Wheeler, $2{,}61 \times 10^{-66}$ centimetri qua-

drati[4] (apprenderemo il significato dell'area di Planck-Wheeler nei prossimi due capitoli). Per un buco pari a 10 masse solari, l'entropia sarebbe l'area del buco, 11.000 chilometri quadrati, divisa per l'area di Planck-Wheeler $2,61 \times 10^{-66}$ centimetri quadrati, che dà approssimativamente 10^{79}.

Si tratta di un enorme ammontare di entropia. Essa rappresenta un'enome quantità di aleatorietà. Dove risiede questa aleatorietà? Dentro al buco, suppose Bekenstein. L'interno del buco deve contenere un numero enorme di atomi, o di molecole, o di qualcosa, tutti distribuiti aleatoriamente, e il numero totale di modi in cui possono essere distribuiti è[5] $10^{10^{79}}$.

Sciocchezze, replicò la maggior parte dei fisici più esperti sui buchi neri, compresi io e Hawking. L'interno del buco contiene una singolarità, e non atomi o molecole.

Ciononostante, la somiglianza tra le leggi della termodinamica e le proprietà dei buchi neri era impressionante.

Nell'agosto del 1972, con l'età dell'oro della ricerca sui buchi neri in pieno svolgimento, i principali esperti mondiali sui buchi neri e circa cinquanta studenti si riunirono sulle Alpi francesi per un intenso mese di lezioni e ricerche congiunte. Il luogo era la stessa scuola estiva di Les Houches, sulla stessa collina verde di fronte al Monte Bianco, in cui nove anni prima (1963) avevo imparato a conoscere i meandri della relatività generale (capitolo X). Nel 1963 ero uno studente, ora, nel 1972, si supponeva fossi un esperto. Al mattino noi «esperti» illustravamo ai nostri colleghi e agli studenti le scoperte che avevamo fatto negli ultimi cinque anni e gli sforzi che si stavano effettuando per ottenere nuove conoscenze: Igor Novikov e io ci rinchiudevamo in una baita e ci affannavamo a scoprire le leggi che governano il gas che si aggrega dentro i buchi neri ed emette raggi X (capitolo VIII), mentre sui divani dell'atrio due miei allievi, Bill Press e Saul Teukolsky cercavano il modo di scoprire se un buco nero rotante è stabile rispetto alle piccole perturbazioni (capitolo VII), e cinquanta metri sopra di noi sulla collina, James Bardeen, Brandon Carter e Stephen Hawking univano le forze per tentare di dedurre dalle equazioni della relatività generale di Einstein l'intero complesso di leggi che governano l'evoluzione dei buchi neri. L'ambientazione era idilliaca, la fisica meravigliosa.

Alla fine del mese, Bardeen, Carter e Hawking avevano consolidato le loro intuizioni in una serie di *leggi della meccanica dei buchi neri* che presentavano una sorprendente somiglianza con le leggi della termodinamica. Ogni legge relativa ai buchi neri si rivelò infatti identica a una legge della termodinamica, se si sostituiva l'espressione «area dell'orizzonte» con il termine «entropia» e

l'espressione «gravità superficiale dell'orizzonte» con «temperatura» (la gravità superficiale, grosso modo, è la forza dell'attrazione gravitazionale sperimentata da un soggetto che si trovi in stato di quiete appena al di sopra dell'orizzonte).

Quando Bekenstein (che era uno dei cinquanta studenti della scuola) vide questa coincidenza perfetta tra i due insiemi di leggi si convinse più che mai del fatto che l'area dell'orizzonte *era* l'entropia del buco nero. Bardeen, Carter, Hawking e io, e gli altri esperti, invece, vedevamo in questa coincidenza una solida prova del fatto che l'area dell'orizzonte *non poteva essere* l'entropia del buco sotto mentite spoglie. Se così fosse stato, allora, in modo analogo, la gravità superficiale avrebbe dovuto essere la temperatura del buco sotto mentite spoglie, e quella temperatura non sarebbe stata zero. Tuttavia, le leggi della termodinamica affermano che ogni e qualsiasi oggetto con una temperatura diversa da zero deve emettere radiazioni, almeno in piccola quantità (è questo il modo in cui funzionano i radiatori che riscaldano alcune abitazioni), e tutti sapevano che i buchi neri non possono emettere niente. La radiazione può cadere dentro un buco nero, ma non può mai uscirne fuori.

Se Bekenstein avesse seguito la sua intuizione fino alle sue conseguenze logiche, avrebbe affermato che in qualche modo un buco nero *deve* avere una temperatura finita e *deve* emettere radiazioni, e oggi lo considereremmo uno sbalorditivo profeta. Ma Bekenstein vacillò. Ammise che era ovvio che un buco nero non poteva emettere radiazioni, ma rimase tenacemente fedele alla sua idea sull'entropia dei buchi neri.

I buchi neri irradiano

Il primo indizio del fatto che i buchi neri possono emettere una radiazione arrivò da Yakov Borisovich Zel'dovich nel giugno del 1971, quattordici mesi prima della scuola estiva di Les Houches. Tuttavia, nessuno vi prestò attenzione, e di questo sono io a portare la colpa maggiore, perché ero il suo confidente e la persona con cui si consultava quando intraprendeva un cammino incerto verso una nuova radicale intuizione.

Zel'dovich mi aveva portato a Mosca per il mio secondo periodo di varie settimane come membro della sua équipe di ricerca. In occasione del mio primo periodo, due anni prima, aveva requisito per me, con la crisi degli alloggi che imperava a Mosca, uno spazioso appartamento privato sulla Shabolovka, vicino alla Piazza d'Ottobre. Mentre alcuni dei miei amici russi

condividevano un appartamento di una stanza con moglie, figli e una serie di parenti – una stanza in tutto, non una stanza da letto – io disponevo solo per me di un appartamento con una stanza da letto, soggiorno, cucina, televisore e delle eleganti porcellane. In questo secondo periodo abitavo in condizioni più modeste in una stanza singola presso un hotel di proprietà dell'Accademia sovietica delle Scienze in fondo alla strada dove si trovava il mio vecchio appartamento.

Un mattino, venni tirato giù dal letto alle 6:30 da una telefonata di Zel'dovich. «Vieni da me, Kip! Ho una nuova idea sui buchi neri rotanti!». Sapendo che mi aspettavano caffè, tè e pirozhki (ravioli ripieni di manzo macinato, pesce, cavolo, marmellata o uova), mi gettai dell'acqua fredda in faccia, infilai i vestiti, afferrai la mia cartella, mi precipitai giù per cinque piani di scale, presi un tram affollato, poi un autobus e sbarcai al numero 2B di Vorobyevskoye Shosse sulle Colline Lenin, dieci chilometri a sud del Cremlino. Accanto, al numero 4, abitava Alexei Kosygin, presidente dell'Urss[6].

Varcai il cancello di una recinzione metallica alta due metri e mezzo ed entrai in un cortile alberato di quattro acri che circondava il massiccio caseggiato numero 2B e il suo gemello numero 2A con la loro vernice gialla scrostata. Tra i compensi ricevuti per i contributi dati alla potenza nucleare sovietica (capitolo VI), Zel'dovich aveva ricevuto uno degli otto appartamenti del 2B: l'angolo esposto a sudovest del secondo piano. L'appartamento era enorme per gli standard sovietici, 135 metri quadrati, e lo condivideva con la moglie, Varvara Pavlova, una figlia e il genero.

Zel'dovich mi accolse sulla porta, con una smorfia amichevole sul viso e i rumori della sua famiglia affaccendata che provenivano dall'interno. Mi tolsi le scarpe, infilai delle pantofole che presi tra quelle ammucchiate accanto alla porta e lo seguii nel dimesso ma confortevole soggiorno/sala da pranzo con i suoi divani e le poltrone eccessivamente imbottiti. A una parete era appesa una mappa del mondo con delle spille colorate che indicavano tutti i posti in cui Zel'dovich era stato invitato (Londra, Princeton, Pechino, Bombay, Tokyo e molti altri) e che lo Stato sovietico, con il suo timore paranoico di perdere dei segreti nucleari, gli aveva proibito di visitare.

Zel'dovich, con gli occhi vispi, mi fece sedere a un lungo tavolo da pranzo che dominava il centro della stanza e mi annunciò: «Un buco nero rotante deve emettere una radiazione. La radiazione, partendo, esercita un rinculo sul buco e gradualmente ne rallenta la rotazione, fino a farlo fermare. Finita la rotazione, cesserà la radiazione e da allora in poi il buco vivrà per sempre in uno stato perfettamente sferico e privo di rotazione».

«È una delle cose più pazzesche che abbia mai sentito», dissi (lo scontro aperto non è il mio stile, ma Zel'dovich lo adorava. Lo desiderava, se lo aspettava e mi aveva fatto venire a Mosca in parte affinché gli facessi da sparring partner, un contendente con cui mettere alla prova le sue idee). «Come puoi fare un'affermazione così folle?», domandai. «Tutti sanno che la radiazione può affluire a un buco nero, ma niente, nemmeno una radiazione può fuoriuscirne».

Zel'dovich mi spiegò il suo ragionamento: «Una sfera di metallo rotante emette radiazione elettromagnetica e quindi, in modo analogo, un buco nero rotante dovrebbe emettere onde gravitazionali».

Una tipica prova di Zel'dovich, pensai tra me. Pura intuizione fisica basata su nient'altro che un'analogia. Zel'dovich non comprende la relatività generale abbastanza bene per calcolare cosa dovrebbe fare un buco nero, e così si mette invece a calcolare il comportamento di una sfera di metallo rotante, poi afferma che un buco nero si comporterà in maniera analoga e mi sveglia alle sei e mezzo del mattino per verificare la sua affermazione.

Tuttavia, avevo già visto Zel'dovich fare scoperte su basi poco più consistenti di queste; come quando nel 1965 aveva affermato, ad esempio, che quando una stella montagnosa implode dà luogo a un buco nero perfettamente sferico (capitolo VII), un'affermazione che si rivelò giusta e predisse la mancanza di peli di un buco nero. Quindi proseguii con cautela. «Non avevo idea del fatto che una sfera di metallo rotante emettesse una radiazione elettromagnetica. In che modo?»

«La radiazione è così debole», spiegò Zel'dovich, «che nessuno l'ha mai osservata, né prevista prima. Tuttavia, deve avvenire, la sfera di metallo emette radiazione quando le fluttuazioni del vuoto la sollecitano. Analogamente, un buco nero emetterà radiazione quando le *fluttuazioni gravitazionali del vuoto* graffiano il suo orizzonte».

Ero troppo tardo nel 1971 per cogliere il significato profondo di questa osservazione, ma diversi anni dopo mi sarebbe divenuto chiaro. *Tutti* i precedenti studi teorici sui buchi neri si erano basati sulle leggi della relatività generale di Einstein, ed erano inequivocabili: un buco nero non può emanare radiazioni. Ma noi teorici sapevamo che la relatività generale è solo un'approssimazione delle vere leggi della gravità, un'approssimazione che dovrebbe essere eccellente quando si tratta dei buchi neri, pensavamo, ma pur sempre un'approssimazione[7]. Le vere leggi, ne eravamo certi, dovevano essere di tipo meccanico quantistico, e così le chiamammo le leggi della *gravità quantistica*. Malgrado queste leggi della gravità quantistica venissero com-

Scheda 12.4
FLUTTUAZIONI DEL VUOTO

Le fluttuazioni del vuoto sono per le onde elettromagnetiche e gravitazionali quello che il «movimento claustrofobico degenere» è per gli elettroni. Si ricordi (capitolo IV) che se si confina un elettrone in una piccola regione di spazio, per quanto intensamente si cerchi di rallentarlo e farlo fermare, le leggi della meccanica quantistica obbligano l'elettrone a continuare a muoversi aleatoriamente, imprevedibilmente. Questo è il moto degenere claustrofobico che produce la pressione grazie alla quale le nane bianche resistono alla loro stessa compressione gravitazionale.

Analogamente, se si cerca di eliminare tutte le oscillazioni elettromagnetiche o gravitazionali da una data regione dello spazio, non vi si riuscirà mai. Le leggi della meccanica quantistica affermano che rimarranno sempre delle oscillazioni aleatorie, imprevedibili, ossia delle onde elettromagnetiche e gravitazionali aleatorie e imprevedibili. Queste sono le fluttuazioni del vuoto che (secondo Zel'dovich) «graffieranno» una sfera di metallo o un buco nero rotanti provocandone l'emissione di radiazioni.

Queste fluttuazioni del vuoto non possono essere fermate privandole dell'energia, perché in media non ne contengono affatto. In alcuni luoghi e in certi istanti di tempo possono avere dell'energia positiva che hanno preso in prestito da altri luoghi, i quali, di conseguenza, hanno un'energia negativa. Come le banche non permettono a lungo ai loro clienti di avere dei conti in rosso, le leggi della fisica obbligano le regioni a energia negativa ad assorbire energia dai loro vicini a energia positiva, e a tornare a un bilancio pari a zero o positivo. Il prestito e la restituzione continui, aleatori, di energia sono ciò che alimenta le fluttuazioni del vuoto.

Come il moto degenere di un elettrone acquista vigore quando esso viene confinato in una regione sempre più piccola (capitolo IV), le fluttuazioni del vuoto delle onde elettromagnetiche o gravitazionali sono più vigorose nelle regioni piccole che in quelle grandi, ossia sono più vigorose per le lunghezze d'onda piccole che per quelle grandi. Ciò, come vedremo nel capitolo XIII, ha profonde conseguenze sulla natura delle singolarità al centro dei buchi neri.

Le fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto sono ben conosciute e costituiscono un elemento comune della fisica di tutti i giorni. Ad esempio,

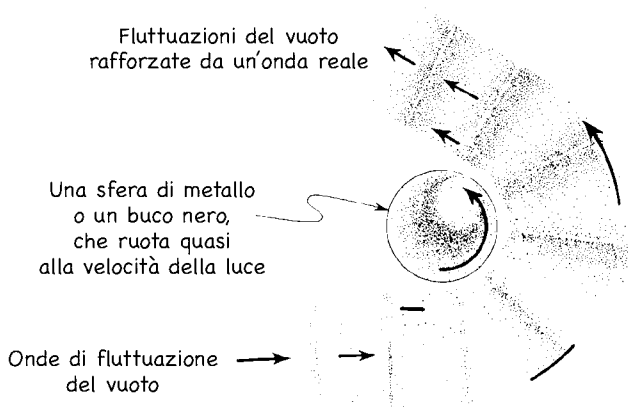
svolgono un ruolo centrale nel funzionamento di una lampadina fluorescente. Una scarica elettrica eccita gli atomi dei vapori di mercurio presenti nella lampadina e poi delle fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto graffiano i singoli atomi eccitati provocando, in un momento aleatorio, l'emissione di parte della loro energia dovuta all'eccitazione sotto forma di onda elettromagnetica (un fotone)*. Questa emissione è detta spontanea perché quando è stata individuata per la prima volta in quanto effetto fisico, i fisici non si resero conto che era innescata dalle fluttuazioni del vuoto. Per fare un altro esempio, all'interno di un laser le fluttuazioni elettromagnetiche aleatorie del vuoto interferiscono con la luce coerente del laser (interferenza nel senso della scheda 10.3), modulandola in modi imprevedibili. Ciò fa sì che i fotoni escano dal laser in momenti casuali, imprevedibili, anziché uniformemente uno dopo l'altro; un fenomeno chiamato *effetto granulare dei fotoni*.

Le fluttuazioni gravitazionali del vuoto, a differenza di quelle elettromagnetiche, non sono ancora mai state osservate sperimentalmente. La tecnologia degli anni Novanta, con grandi sforzi, dovrebbe riuscire a individuare le onde gravitazionali ad alta energia derivanti dalla collisione dei buchi neri (capitolo X), ma non le assai più deboli fluttuazioni del vuoto delle onde.

---

* Questo fotone «primario» viene assorbito da un rivestimento al fosforo sulle pareti della lampadina, che a sua volta emette fotoni «secondari» che vediamo sotto forma di luce.

prese a dir poco solo vagamente, John Wheeler aveva dedotto negli anni Cinquanta che dovevano comportare delle fluttuazioni gravitazionali del vuoto, minime, imprevedibili fluttuazioni della curvatura dello spaziotempo, fluttuazioni che restano anche quando lo spaziotempo è completamente vuoto di qualsiasi materia e si cerca di eliminare da esso tutte le onde gravitazionali, ossia quando è un vuoto perfetto (scheda 12.4). Zel'dovich affermava di prevedere, in base alla sua analogia elettromagnetica, che queste fluttuazioni gravitazionali del vuoto avrebbero spinto il buco a emettere radiazioni. «Ma in che modo?», chiesi perplesso.

Zel'dovich saltò in piedi, si diresse rapidamente a una lavagna di un metro quadrato appesa alla parete opposta a quella della mappa e cominciò a tracciare un disegno e a parlare al tempo stesso. Il suo disegno (figura 12.1) mo-

12.1 – Il meccanismo di Zel'dovich con cui le fluttuazioni del vuoto spingono un corpo rotante a emettere radiazioni. [La freccia esterna indica la velocità della luce e quella più interna, metà della velocità della luce].

strava un'onda che procedeva verso un oggetto rotante, aleggiava sulla sua superficie per un po' e poi passava oltre. L'onda poteva essere elettromagnetica e l'oggetto rotante una sfera di metallo, spiegò Zel'dovich, oppure un'onda gravitazionale e l'oggetto un buco nero.

L'onda in arrivo non è un'onda «reale», spiegò Zel'dovich, ma piuttosto una fluttuazione del vuoto. Quando quest'onda fluttuante gira attorno al corpo che ruota si comporta come una fila di pattinatori sul ghiaccio che fanno una curva: i pattinatori esterni devono girare a gran velocità e quelli interni molto più lentamente; analogamente, la parte esterna dell'onda si muove a una velocità molto elevata, la velocità della luce, mentre le sue parti interne si muovono molto più lentamente della luce e, in realtà, molto più lentamente della superficie del corpo che sta ruotando[8]. In una situazione simile, affermava Zel'dovich, il corpo che ruota rapidamente farà presa sull'onda fluttuante e la farà accelerare, proprio come un ragazzino fa accelerare una fionda roteandola sempre più velocemente. L'accelerazione immette parte dell'energia rotazionale del corpo nell'onda, amplificandola. La nuova porzione amplificata è un'onda «reale» con un'energia totale positiva, mentre la porzione originaria, non amplificata, resta una fluttuazione del vuoto con zero energia in totale (scheda 12.4). Il corpo rotante ha pertanto utiliz-

zato la fluttuazione del vuoto come una specie di catalizzatore per creare un'onda reale, come uno stampo per la forma dell'onda reale. Ciò è simile, sottolineò Zel'dovich al modo in cui le fluttuazioni del vuoto fanno emettere «spontaneamente» luce a una molecola che vibra (scheda 12.4).

Zel'dovich mi disse di aver provato che una sfera di metallo rotante emette radiazione in questo modo; la sua prova si basava sulle leggi dell'*elettrodinamica quantistica*, ossia le ben note leggi che nascono dall'incontro della meccanica quantistica con le leggi dell'elettromagnetismo di Maxwell. Sebbene non avesse una prova simile del fatto che un buco nero rotante emettesse radiazioni, egli, per analogia, ne era abbastanza sicuro. In realtà, egli affermava, un buco che ruota non irradierà solo onde gravitazionali, ma anche onde elettromagnetiche (fotoni[9]), neutrini e tutte le altre forme di radiazioni esistenti in natura.

Ero abbastanza sicuro che Zel'dovich si sbagliasse. Varie ore più tardi, senza che si intravedesse un accordo, Zel'dovich mi propose una scommessa. Nei romanzi di Ernest Hemingway, Zel'dovich aveva letto del White Horse scotch, un'elegante ed esclusiva marca di whisky. Se i calcoli dettagliati effettuati con le leggi della fisica avessero dimostrato che un buco nero rotante emana radiazioni, avrei dovuto portare a Zel'dovich una bottiglia di White Horse dall'America. Se i calcoli dimostravano che non vi era alcuna radiazione del genere, Zel'dovich mi avrebbe portato una bottiglia di ottimo cognac georgiano.

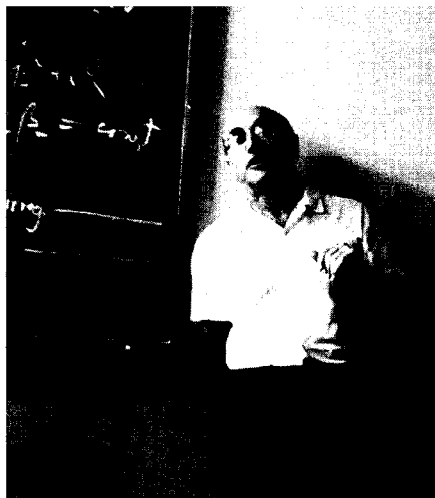
Accettai la scommessa, ma sapevo che non si sarebbe risolta tanto presto. Per risolverla bisognava riuscire a capire l'unione della relatività generale e della meccanica quantistica in modo molto più profondo di quanto non si fosse in grado nel 1971.

Una volta fatta la scommessa, me ne dimenticai. Ho una memoria labile e la mia ricerca si concentrava su aspetti diversi. Ma Zel'dovich non se ne dimenticò; varie settimane dopo aver discusso con me, mise per iscritto la sua tesi e la inviò per farla pubblicare. Il redattore incaricato della valutazione probabilmente avrebbe rifiutato il manoscritto se fosse venuto da qualcun altro; la sua tesi era troppo euristica per essere accolta. Ma la reputazione di Zel'dovich prevalse e l'articolo venne pubblicato – e quasi nessuno gli prestò attenzione. Dei buchi neri che emettevano radiazioni sembravano terribilmente poco plausibili.

Un anno dopo, alla scuola estiva di Les Houches, noi «esperti» ignoravamo ancora l'idea di Zel'dovich. Non ricordo che venisse menzionata neppure una volta[10].

Nel settembre del 1973 ero di nuovo a Mosca, questa volta per accompagnare Stephen Hawking e sua moglie Jane. Era il primo viaggio di Stephen a Mosca dai tempi in cui era studente. Egli, Jane e Zel'dovich (il nostro anfitrione a Mosca), preoccupati di come riuscire a soddisfare le particolari necessità di Stephen a Mosca, pensarono che la cosa migliore era che io, essendo amico intimo suo e di Jane e conoscendo bene Mosca, facessi loro da accompagnatore, da interprete durante le conversazioni sulla fisica, e da guida.

Risiedevamo all'Hotel Rossiya, appena fuori della Piazza Rossa vicino al Cremlino. Sebbene ci avventurassimo fuori ogni giorno per tenere lezioni in un istituto o nell'altro, o per visitare un museo, l'opera o il balletto, le nostre interazioni con i fisici sovietici avvenivano perlopiù nelle due camere della suite di Hawking, che dava sulla cattedrale di San Basilio. Uno dopo l'altro, i principali fisici teorici dell'Unione Sovietica vennero all'hotel a rendere omaggio a Hawking e a conversare con lui.

A sinistra: Stephen Hawking ascolta una lezione alla scuola estiva di Les Houches nell'estate del 1972. *A destra*: Yakov Borisovich Zel'dovich alla lavagna nel suo appartamento a Mosca nell'estate del 1971. [Fotografie di Kip Thorne].

Tra i fisici che fecero ripetute visite nella camera di Hawking c'erano Zel'dovich e il suo dottorando Alexi Starobinsky. Hawking trovò Zel'dovich e Starobinsky affascinanti quanto loro lui. Durante una visita, Starobinsky descrisse la congettura di Zel'dovich secondo cui un buco nero potrebbe emettere radiazioni, descrisse una parziale unione della meccanica quantistica con la relatività generale che avevano elaborato lui e Zel'dovich (basata sul precedente, pionieristico lavoro di Bryce DeWitt, Leonard Parker e altri), e poi descrisse una prova, usando quest'unione parziale, del fatto che un buco rotante emette effettivamente radiazioni. Zel'dovich era sulla buona strada per vincere la scommessa che aveva fatto con me.

Di tutte le cose di cui Hawking venne a conoscenza durante le sue conversazioni a Mosca, questa era quella che lo affascinava di più. Tuttavia, era scettico sul modo in cui Zel'dovich e Starobinsky avevano combinato le leggi della relatività generale con quelle della meccanica quantistica, così, una volta tornato a Cambridge, cominciò a elaborare la sua unione parziale della meccanica quantistica e della relatività generale e a usarla per verificare l'affermazione di Zel'dovich secondo cui i buchi rotanti possono emettere radiazioni.

Nel frattempo, vari altri fisici in America stavano facendo la stessa cosa, tra cui William Unruh (un recente allievo di Wheeler) e Don Page (un mio allievo). Agli inizi del 1974 Unruh e Page, ognuno a suo modo, avevano confermato in modo un po' esitante la previsione di Zel'dovich: un buco nero rotante doveva emettere radiazioni finché la sua energia rotazionale non si fosse del tutto esaurita e le emissioni non si fossero arrestate. Dovevo ammettere di aver perso la mia scommessa.

I buchi neri si contraggono ed esplodono

Poi arrivò la bomba. Stephen Hawking, prima in una conferenza in Inghilterra e poi in un breve articolo tecnico sulla rivista «Nature», annunciò una bizzarra previsione, una previsione in contrasto con Zel'dovich, Starobinsky, Page e Unruh. I calcoli di Hawking confermavano che un buco nero rotante deve emettere radiazioni e rallentare la sua rotazione. Ma essi prevedevano anche che, una volta cessata la rotazione, il buco non avrebbe smesso di emettere radiazioni. Senza rotazione e senza energia il buco continua a emettere radiazioni di ogni tipo (gravitazionali, elettromagnetiche, neutrini) e facendolo continua a perdere energia. Mentre l'energia rotazionale era im-

magazzinata nel vortice dello spazio esterno, l'energia che ora andava perduta poteva provenire da un solo luogo: dall'interno del buco nero!

Altrettanto stupefacente, i calcoli di Hawking prevedevano che lo spettro della radiazione (ossia la quantità di energia irradiata a ogni lunghezza d'onda) fosse esattamente come lo spettro della radiazione termica emessa da un corpo caldo. In altre parole, un buco nero si comporta esattamente come se il suo orizzonte avesse una temperatura finita e tale temperatura, questa era la conclusione di Hawking, è proporzionale alla gravità superficiale del buco. Questa (se Hawking aveva ragione) era una prova incontrovertibile che le leggi di Bardeen-Carter-Hawking della meccanica dei buchi neri *erano* le leggi della termodinamica sotto mentite spoglie e che, come aveva affermato Bekenstein due anni prima, un buco nero ha un'entropia proporzionale all'area della sua superficie.

I calcoli di Hawking dicevano di più. Una volta che la sua rotazione ha rallentato, l'entropia del buco e l'area del suo orizzonte sono proporzionali al quadrato della sua massa, mentre la sua temperatura e la gravità superficiale sono proporzionali alla massa divisa per l'area, ovvero inversamente proporzionali alla sua massa. Pertanto, se il buco continua a emettere radiazioni, convertendo massa in energia che fluisce verso l'esterno, la sua massa diminuisce, la sua entropia e la sua massa diminuiscono e la sua temperatura e la gravità superficiale aumentano. Il buco si contrae e diventa più caldo. In realtà, il buco sta evaporando.

Un buco nero formatosi di recente per implosione stellare (e che quindi ha una massa superiore al doppio di quella del Sole) ha una temperatura molto bassa: meno di 3×10^{-8} gradi al di sopra dello zero assoluto (0,03 microkelvin). Pertanto, l'evaporazione all'inizio è molto lenta, tanto lenta che il buco richiederà più di 10^{67} anni (10^{57} volte l'età attuale dell'Universo) per contrarsi in misura apprezzabile. Ma quando il buco si contrae e si riscalda, inizierà a irradiare più intensamente e la sua evaporazione accelererà. Infine, una volta che la massa del buco si sia ridotta a un livello compreso tra un migliaio di tonnellate e 100 milioni di tonnellate (non sappiamo con certezza quale sia il livello preciso) il buco sarà talmente caldo (tra 1000 miliardi e 100 milioni di miliardi di gradi) che esploderà violentemente in una frazione di secondo.

La dozzina di esperti esistente in tutto il mondo sulla questione dell'unione parziale tra relatività generale e meccanica quantistica era certa che Hawking si fosse sbagliato. Le sue conclusioni violavano tutto ciò che si sapeva

sui buchi neri. Forse la sua unione parziale, diversa da quella di altri, era errata; o forse aveva realizzato un'unione corretta, ma aveva commesso degli errori nei calcoli.

Negli anni seguenti, gli esperti esaminarono minuziosamente la versione dell'unione parziale di Hawking e quelle elaborate da loro, i calcoli di Hawking relativi alle onde provenienti dai buchi neri e quelli effettuati da loro. Gradualmente, un esperto dopo l'altro, cominciarono a concordare con Hawking, e nel corso di questo processo consolidarono l'unione parziale dando vita a un nuovo corpus di leggi della fisica. Le nuove leggi prendono il nome di *teoria quantistica dei campi nello spaziotempo curvo*, perché derivano da un'unione parziale in cui il buco nero è considerato come un oggetto dello spaziotempo curvo non quantistico ma relativistico-generale, mentre le onde gravitazionali, quelle elettromagnetiche e altri tipi di radiazione sono considerati come *campi quantistici*; in altre parole, come onde soggette alle leggi della meccanica quantistica e che pertanto a volte si comportano come onde e altre volte come particelle (si veda la scheda 4.1). Un'unione completa della relatività generale e della teoria quantistica, ossia le leggi completamente corrette della gravità quantistica, tratterebbe qualsiasi cosa, compreso lo spaziotempo curvo del buco, come meccanico-quantistica, cioè soggetta al principio di indeterminazione (scheda 10.2), al dualismo onda/particella (scheda 4.1) e alle fluttuazioni del vuoto (scheda 12.4). Torneremo su quest'unione completa e alcune delle sue implicazioni nel capitolo seguente.

Come era possibile trovare un accordo sulle leggi fondamentali dei campi quantistici nello spaziotempo curvo senza alcun esperimento che ne guidasse la scelta? Come potevano affermare gli esperti, quasi con certezza, che Hawking aveva ragione senza esperimenti che ne confermassero le affermazioni? La loro quasi certezza proveniva dal requisito che le leggi dei campi quantistici e quelle dello spaziotempo curvo si armonizzassero in modo perfettamente coerente (senza questa totale coerenza, le leggi della fisica avrebbero potuto fornire una previsione se utilizzate in un modo, ad esempio, che i buchi neri non emettono mai radiazioni, e un'altra se utilizzate in modo diverso, ad esempio, che i buchi neri devono emettere sempre radiazioni. I poveri fisici, non sapendo a quale credere, avrebbero fallito).

Le nuove leggi armonizzate dovevano essere coerenti con le leggi dello spaziotempo curvo della relatività generale in assenza di campi quantistici e con le leggi dei campi quantistici in assenza di curvatura dello spaziotempo. Questo e il requisito di una perfetta coerenza, analogo al requisito che le righe e le colonne di un cruciverba si incrocino perfettamente, hanno deter-

minato la forma delle nuove leggi quasi[11] completamente. Se queste leggi potevano armonizzarsi in modo del tutto coerente (e devono poterlo fare, se l'approccio dei fisici alla conoscenza dell'Universo ha una qualche logica), allora potevano armonizzarsi solo nel modo descritto dalla nuova e approvata teoria quantistica dei campi nello spaziotempo curvo.

Il requisito che le leggi della fisica si armonizzino in modo coerente viene spesso usato come strumento nella ricerca di nuove leggi. Ma raramente il requisito della coerenza ha rivelato tanta efficacia come in questo caso, nell'ambito della teoria quantistica dei campi nello spaziotempo curvo. Ad esempio, quando Einstein stava elaborando le leggi della relatività generale (capitolo II), le considerazioni sulla coerenza non potevano indicargli, e non gli hanno indicato, la premessa di partenza, ossia che la gravità è dovuta a una curvatura dello spaziotempo; questa premessa nasce in gran parte dall'intuizione di Einstein. Tuttavia, con questa premessa in mano, il requisito che le nuove leggi della relatività generale si armonizzassero in modo coerente con le leggi della gravità di Newton quando la gravità è debole, e con le leggi della relatività ristretta quando la gravità è del tutto assente, ha determinato la forma delle nuove leggi in modo quasi unico; è stato l'elemento fondamentale che ha portato Einstein a scoprire la sua equazione di campo.

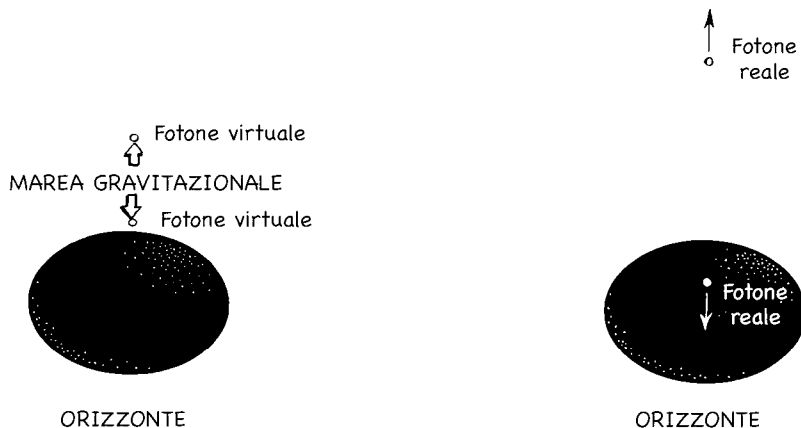
Nel settembre del 1975 tornai a Mosca per la mia quinta visita e portai con me una bottiglia White Horse scotch per Zel'dovich. Con mia sorpresa scoprii che malgrado tutti gli esperti occidentali fossero ormai d'accordo sul fatto che Hawking aveva ragione e che i buchi neri possono evaporare, a Mosca nessuno credeva ai calcoli o alle conclusioni di Hawking. Sebbene diverse conferme delle affermazioni di Hawking, ottenute con nuovi metodi completamente diversi, fossero state pubblicate tra il 1974 e il 1975, esse avevano avuto scarso impatto nell'Urss. Perché? Perché Zel'dovich e Starobinsky, i più grandi esperti sovietici, non ci credevano, essi continuavano a sostenere che quando un buco nero che emette radiazioni ha smesso completamente di ruotare, deve smettere di irradiare, e quindi non può evaporare completamente. Discussi con Zel'dovich e Starobinsky, ma senza profitto; essi avevano una conoscenza talmente più vasta della mia sulla quantistica dei campi nello spaziotempo curvo che, pur essendo sicuro (come al solito) di essere dalla parte della ragione, non riuscii a controbattere le loro argomentazioni.

Il mio volo di ritorno in America era previsto per martedì 23 settembre. Il lunedì sera, mentre facevo i bagagli nella mia stanzetta dell'hotel dell'Uni-

versità, squillò il telefono. Era Zel'dovich: «Vieni da me, Kip! Voglio parlare dell'evaporazione dei buchi neri!». A corto di tempo, cercai un taxi davanti all'hotel. Non ce n'era neanche uno in vista e così, secondo le abitudini di Mosca, feci cenno a un motociclista di passaggio e gli offrii cinque rubli per portarmi al 2B di Vorobyevskoye Shosse. Quello annuì e partimmo, passando per strade laterali che non avevo mai percorso. La paura di perdermi scomparve quando spuntammo in Vorobyevskoye Shosse. Con un grande «spacibo!» smontai di sella davanti al 2B, attraversai il cancello e il cortile alberato, entrai nell'edificio, e salii le scale fino al secondo piano, lato sudovest.

Zel'dovich e Starobinsky mi salutarono sulla porta con una smorfia sul viso e le mani alzate: «Ci arrendiamo; Hawking ha ragione e noi abbiamo torto!». Passarono l'ora seguente a descrivermi come la loro versione della teoria quantistica dei campi nello spaziotempo curvo di un buco nero, pur se apparentemente diversa, era in realtà del tutto equivalente a quella di Hawking. Essi erano giunti alla conclusione che i buchi neri non possono evaporare a causa di un errore di calcolo, non perché le leggi erano sbagliate. Una volta corretto l'errore, erano d'accordo anche loro. Non c'era altra possibilità. Le leggi richiedono che i buchi neri evaporino.

Vi sono diversi modi di raffigurare l'evaporazione dei buchi neri, così come vi sono vari modi diversi di formulare le leggi quantistiche dei campi nello spaziotempo curvo di un buco nero. Ma tutti i modi riconoscono nelle fluttuazioni del vuoto la sorgente ultima delle radiazioni emesse all'esterno. Forse la raffigurazione più semplice è quella basata sulle particelle anziché sulle onde.

Le fluttuazioni del vuoto, come le onde «reali» a energia positiva, sono soggette alle leggi del dualismo onda/particella (scheda 4.1), ossia esse hanno sia l'aspetto di onde che di particelle. Abbiamo già visto l'aspetto che hanno come onde (scheda 12.4): le onde fluttuano aleatoriamente e imprevedibilmente, con energia momentaneamente positiva qui e momentaneamente negativa lì, e zero energia in media. Il loro aspetto come particelle è insito nel concetto di particelle virtuali, ovvero particelle che compaiono improvvisamente a coppie (due particelle per volta), sfruttano momentaneamente l'energia delle fluttuazioni presa in prestito da regioni vicine dello spazio e poi si annichiliscono e scompaiono restituendo la loro energia alle regioni vicine dello spazio. Per le fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto le particelle virtuali sono *fotoni virtuali*, per le fluttuazioni gravitazionali del vuoto esse sono *gravitoni virtuali*[12].

12.2 – Il meccanismo dell'evaporazione dei buchi neri, visto da un soggetto che stia precipitando dentro il buco. Sinistra: La marea gravitazionale di un buco nero separa una coppia di fotoni virtuali, immettendovi in tal modo energia. Destra: I fotoni virtuali hanno acquisito abbastanza energia dalla marea gravitazionale per materializzarsi permanentemente in fotoni reali, uno dei quali fuoriesce dal buco, mentre l'altro cade all'interno verso il centro.

Il modo in cui le fluttuazioni del vuoto provocano l'evaporazione dei buchi neri è illustrato nella figura 12.2. Sulla sinistra viene raffigurata una coppia di fotoni virtuali in prossimità dell'orizzonte di un buco nero, così come appare nel quadro di riferimento di un soggetto che stia cadendo dentro il buco. I fotoni virtuali possono separarsi facilmente finché restano entrambi in una regione in cui il campo elettromagnetico abbia momentaneamente acquisito energia positiva. Le dimensioni di tale regione possono essere di qualsiasi tipo, da minuscole a enormi, poiché le fluttuazioni del vuoto avvengono su tutte le scale di lunghezza; tuttavia le dimensioni della regione saranno sempre all'incirca le stesse della lunghezza d'onda della sua onda elettromagnetica che sta fluttuando, perciò i fotoni virtuali possono separarsi solo grosso modo di una lunghezza d'onda. Se la lunghezza d'onda viene a coincidere all'incirca con la circonferenza del buco, i fotoni virtuali possono facilmente separarsi di un quarto della circonferenza, come indicato nella figura.

La marea gravitazionale in prossimità dell'orizzonte è molto forte; essa separa i fotoni virtuali con una forza enorme, trasmettendo loro in tal modo una grande energia, così come osservato dal soggetto che sta precipitando nel buco e che si trova a metà strada tra i due fotoni. L'aumento di energia dei fotoni è sufficiente, nel momento in cui i due fotoni sono separati da una distanza pari a un quarto della circonferenza dell'orizzonte, a convertirli in fotoni reali di lunga durata (parte destra della figura 12.2), e a lasciargliene abbastanza da permettere a essi di restituirla alle vicine regioni dello spazio a energia negativa. I fotoni, divenuti ormai reali, sono liberi l'uno dall'altro. Uno è all'interno dell'orizzonte e perduto per sempre per l'Universo esterno. L'altro fugge dal buco portando con sé l'energia (ossia la massa[13]) fornitagli dalla marea gravitazionale. Il buco, con la sua massa ridotta, si contrae un po'.

Questo meccanismo di emissione delle particelle non dipende dal fatto che siano fotoni e che le onde a essi associate siano elettromagnetiche. Il meccanismo funzionerebbe altrettanto bene per tutte le altre forme di onda/particella (ossia per tutti i tipi di radiazioni – gravitazionali, neutrini e così via), e pertanto un buco nero emette *tutti* i tipi di radiazioni.

Prima di materializzarsi in particelle reali, le particelle virtuali devono trovarsi vicine a una distanza minore, grosso modo, della lunghezza d'onda delle loro onde. Per acquisire dalla marea gravitazionale del buco abbastanza energia per materializzarsi, tuttavia, tra esse deve esserci una distanza pari all'incirca a un quarto della circonferenza del buco. Ciò significa che le lunghezze d'onda delle particelle/onde emesse dal buco avranno dimensioni pari o superiori a un quarto della circonferenza del buco.

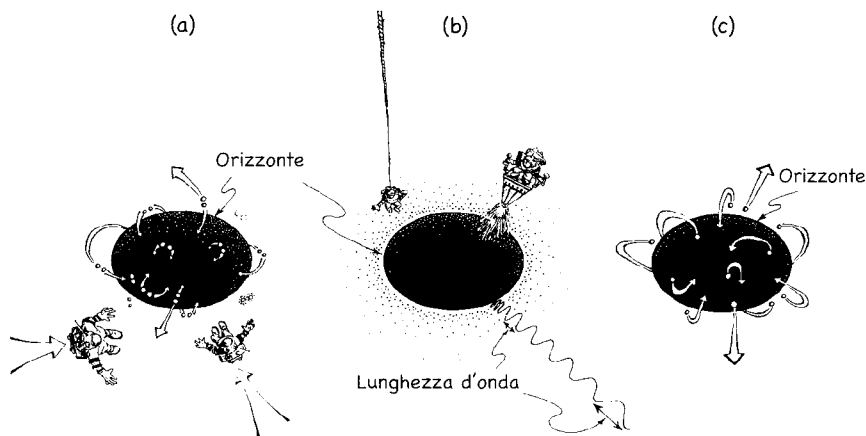
Un buco nero con una massa doppia di quella del Sole ha una circonferenza di circa 35 chilometri, e pertanto le particelle/onde che emette hanno lunghezze d'onda di circa 9 chilometri e più. Si tratta di lunghezze d'onda enormi rispetto a quelle della luce o delle comuni onde radio, ma non molto diverse da quelle delle onde gravitazionali che il buco nero emetterebbe se collidesse con un altro buco.

Durante i primi anni della sua carriera, Hawking cercava di procedere in modo molto attento e rigoroso nella sua ricerca. Non affermava mai che una cosa era vera se non poteva provarla in modo quasi incontrovertibile. Ma nel 1974 aveva cambiato atteggiamento: «Preferisco avere ragione che essere rigoroso», mi disse convinto. Riuscire a essere molto rigorosi richiede molto tempo. Nel 1974 Hawking si era prefissato degli obiettivi riguardo alla comprensione dell'unione completa della relatività generale e della meccanica

quantistica e alla conoscenza dell'origine dell'Universo, obiettivi che richiedevano enormi quantità di tempo e di concentrazione. Sentendosi forse più limitato di altri a causa della malattia che gli accorciava la vita, Hawking sentiva di non potersi gingillare con le sue scoperte tanto a lungo da raggiungere un alto grado di rigore, né poteva permettersi di esplorare tutti gli aspetti importanti delle sue scoperte. Doveva procedere a gran velocità.

Fu così che Hawking nel 1974, avendo dimostrato in modo convincente che un buco nero emette radiazioni pur avendo una temperatura proporzionale alla sua gravità superficiale, procedette ad affermare, senza disporre di prove concrete, che *tutte* le altre somiglianze tra le leggi della meccanica dei buchi neri e le leggi della termodinamica erano più di una coincidenza. Le leggi dei buchi neri *sono la stessa cosa* delle leggi della termodinamica, ma sotto mentite spoglie. Da questa affermazione e dalla sua solida dimostrazione del rapporto fra temperatura e gravità superficiale, Hawking dedusse un preciso rapporto fra l'entropia del buco e l'area della sua superficie: l'entropia è 0,10857... volte[14] l'area della superficie divisa per l'area di Planck-Wheeler. In altre parole, Un buco non rotante pari a 10 masse solari ha un'entropia di $4{,}6\times10^{78}$, che corrisponde approssimativamente all'ipotesi di Bekenstein.

Bekenstein, naturalmente era sicuro che Hawking avesse ragione ed era raggiante di soddisfazione. Alla fine del 1975 Zel'dovich, Starobinsky, e anche io e altri colleghi di Hawking eravamo fortemente inclini a essere d'accordo con lui, Tuttavia, non ci saremmo sentiti pienamente soddisfatti finché non avessimo compreso la natura esatta dell'enorme aleatorietà di un buco nero. Dovevano esserci $10^{4{,}6\times10^{78}}$ modi di distribuire *qualcosa* all'interno di un buco nero senza modificarne l'aspetto esterno (la massa, la velocità di rotazione e la carica), ma cosa era quel qualcosa? E come si poteva, in termini fisici semplici, comprendere il comportamento termico di un buco nero, il fatto che si comporti come un comune corpo dotato di temperatura? Mentre Hawking procedeva con le sue ricerche sulla gravità quantistica e sulle origini dell'Universo, Paul Davies, Bill Unruh, Robert Wald, James York, io e molti altri dei suoi colleghi ci tuffammo su questi aspetti. Gradualmente, nel corso dei dieci anni successivi arrivammo alla nuova concezione illustrata nella figura 12.3.

La figura 12.3a illustra le fluttuazioni del vuoto di un buco nero viste da degli osservatori che stanno precipitando dentro il suo orizzonte. Le fluttuazioni del vuoto consistono in coppie di particelle virtuali. Occasionalmente, la marea gravitazionale riesce a dare a una delle tantissime coppie abbastanza

12.3 – (a) Agli osservatori che precipitano in un buco nero (i due omini in tuta spaziale) le fluttuazioni del vuoto vicino all'orizzonte del buco appaiono sotto forma di coppie di particelle virtuali. (b) Viste da osservatori che si trovano appena al di sopra dell'orizzonte del buco e in stato di quiete rispetto a esso (l'omino appeso a una corda e quello che aziona il suo propulsore), le fluttuazioni del vuoto consistono in un'atmosfera calda di particelle reali; questo è il «punto di vista accelerato». (c) Le particelle dell'atmosfera, nel punto di vista accelerato, sembrano essere emesse da un orizzonte caldo simile a una membrana. Compiono brevi tragitti verso l'alto e la maggior parte di esse viene trascinata indietro nell'orizzonte. Tuttavia, qualcuna riesce a sfuggire alla presa del buco ed evapora nello spazio esterno.

energia da far diventare reali le sue due particelle virtuali e da farne sfuggire una dal buco nero. Questo era il punto di vista sulle fluttuazioni del vuoto e l'evaporazione dei buchi neri presentato nella figura 12.2.

La figura 12.3b illustra un punto di vista diverso sulle fluttuazioni del vuoto del buco, il punto di vista di osservatori che si trovino appena al di sopra dell'orizzonte del buco e che siano per sempre in stato di quiete rispetto a esso. Per evitare di essere inghiottiti dal buco, questi osservatori devono avere una potente accelerazione rispetto agli osservatori in caduta, devono azionare dei propulsori o essere appesi a una corda. Per questa ragione il

punto di vista di tali osservatori è detto «punto di vista accelerato». È anche il punto di vista del paradigma della «membrana» (capitolo XI).

Sorprendentemente, dal punto di vista accelerato, le fluttuazioni del vuoto consistono non di particelle virtuali che si manifestano e scompaiono in un lampo, ma di particelle reali dotate di energia positiva e durature; si veda la scheda 12.5. Le particelle reali formano un'atmosfera calda attorno al buco, in modo molto simile all'atmosfera del Sole. Alle particelle reali sono associate le onde reali. Quando una particella si muove verso l'alto attraverso l'atmosfera, la gravità esercita su di essa la sua attrazione riducendo l'energia del suo moto; analogamente, quando un'onda si muove verso l'alto viene spostata verso il rosso dalla gravità su lunghezze d'onda sempre più lunghe (figura 12.3b).

La figura 12.3c illustra il movimento di alcune particelle nell'atmosfera di un buco nero, dal punto di vista accelerato. Le particelle sembrano essere emesse dall'orizzonte; la maggior parte di esse vola verso l'alto per brevi distanze e poi viene trascinata indietro verso l'orizzonte dalla forte gravità del buco, ma qualcuna riesce a sfuggire alla sua presa. Le particelle che sfuggono sono le stesse che gli osservatori in caduta verso il buco vedono materializzarsi dalle coppie virtuali (figura 12.3a). Esse sono le particelle che evaporano di Hawking.

Dal punto di vista accelerato, l'orizzonte si comporta come una superficie simile a una membrana ad alta temperatura; è la membrana del «paradigma della membrana» descritto nel capitolo XI. Come la superficie calda del Sole emette particelle (ad esempio, i fotoni che costituiscono la luce del giorno sulla Terra), anche la membrana calda dell'orizzonte emette particelle: le particelle che costituiscono l'atmosfera del buco e le poche che evaporano. Lo spostamento gravitazionale verso il rosso riduce l'energia delle particelle quando attraversano la membrana dirigendosi verso l'alto, perciò, malgrado la membrana stessa sia estremamente calda, la radiazione che evapora è molto più fredda.

Il punto di vista accelerato non solo spiega il senso in cui un buco nero è caldo, ma anche la sua enorme aleatorietà. Il seguente esperimento mentale (escogitato da me e dal mio postdoc Wojciech Zurek), spiega come.

Gettate nell'atmosfera di un buco nero una piccola quantità di materiale dotato di una piccola quantità di energia (o, in modo equivalente, di massa), momento angolare (rotazione) e carica elettrica. Dall'atmosfera, questo materiale continuerà a scendere attraverso l'orizzonte e dentro il buco. Una volta che il materiale è entrato nel buco, è impossibile venire a sapere qual-

Scheda 12.5

ACCELERAZIONE DELLA RADIAZIONE

Nel 1975 un nuovo allievo di Wheeler, William Unruh, e in modo indipendente William Davies al King's College di Londra, scoprirono (utilizzando la teoria quantistica dei campi nello spaziotempo curvo) che gli osservatori accelerati che si trovano appena al di sopra dell'orizzonte di un buco nero devono vedere le fluttuazioni del vuoto che vi hanno luogo non come coppie di particelle virtuali, ma come un'atmosfera di particelle reali, un'atmosfera che Unruh chiamò «accelerazione della radiazione».
La sorprendente scoperta rivelò che il concetto di particella reale è relativo, non assoluto, ossia dipende dal quadro di riferimento del soggetto. Gli osservatori che si trovano in quadri di riferimento in caduta libera che precipitano attraverso l'orizzonte del buco non vedono delle particelle reali all'esterno dell'orizzonte, ma solo virtuali. Gli osservatori in quadri accelerati che, per via della loro accelerazione, restano sempre al di sopra dell'orizzonte vedono un gran numero di particelle reali.
Come è possibile? Come può un osservatore affermare che l'orizzonte è circondato da un'atmosfera di particelle reali e l'altro che non lo è? La risposta risiede nel fatto che le onde di fluttuazione del vuoto delle particelle virtuali non sono confinate unicamente nella regione al di sopra dell'orizzonte; ogni onda di fluttuazione si trova in parte all'interno dell'orizzonte e in parte all'esterno.

• Gli osservatori in caduta libera, che precipitano attraverso l'orizzonte, possono vedere entrambe le parti dell'onda di fluttuazione del vuoto, la parte all'interno dell'orizzonte e la parte all'esterno; perciò tali osservatori sono consapevoli (grazie alle loro misurazioni) del fatto che l'onda è una pura fluttuazione del vuoto e di conseguenza che le sue particelle sono virtuali, non reali.
• Gli osservatori accelerati, che restano sempre al di fuori dell'orizzonte, possono vedere solo la parte esterna dell'onda di fluttuazione del vuoto, non quella interna, e di conseguenza le loro misurazioni non sono in grado di discernere che l'onda è una pura fluttuazione del vuoto accompagnata da particelle virtuali. Vedendo solo una parte dell'onda di fluttuazione, la prendono erroneamente per «una cosa reale», un'onda reale accompagnata

da particelle reali, e di conseguenza le loro misurazioni rivelano tutt'intorno all'orizzonte un'atmosfera di particelle reali.

Che le particelle reali di questa atmosfera possano gradualmente evaporare e fuoriuscire nell'Universo esterno (figura 12.3c) sta a indicare che il punto di vista degli osservatori accelerati è altrettanto corretto, ossia altrettanto valido, di quello degli osservatori in caduta libera: ciò che questi ultimi vedono come coppie virtuali trasformate in particelle reali dalla marea gravitazionale, cui fa seguito l'evaporazione di una delle particelle reali, è visto dagli osservatori accelerati semplicemente come l'evaporazione di una delle particelle che è sempre stata reale e ha sempre abitato l'atmosfera del buco nero. Entrambi i punti di vista sono corretti; essi sono la stessa situazione fisica vista da due quadri di riferimento diversi.

cosa sulla sua natura (sia che consistesse di materia, di antimateria, di fotoni e atomi pesanti, o di elettroni e positroni) studiando il buco dall'esterno, ed è impossibile venire a sapere da dove è stato introdotto il materiale. Dato che un buco nero non ha «peli», tutto ciò che si può scoprire esaminando il buco dall'esterno sono le quantità totali della sua massa, del momento angolare e della carica che sono entrate nell'atmosfera.

Domandatevi ora in quanti modi queste quantità di massa, momento angolare e carica *potrebbero* essere state immesse nell'atmosfera calda del buco. Ciò è analogo a chiedersi in quanti modi i giocattoli del bambino *avrebbero potuto* essere distribuiti sulle mattonelle della stanza dei giochi della scheda 12.3, e analogamente il logaritmo del numero di modi di immissione deve essere l'aumento dell'entropia nell'atmosfera, così come è descritto dalle leggi standard della termodinamica. Attraverso un calcolo abbastanza semplice, Zurek e io siamo stati in grado di dimostrare che questo aumento dell'entropia termodinamica è esattamente uguale a ¼ di volte l'incremento dell'area dell'orizzonte diviso per l'area di Planck-Wheeler; ossia, è esattamente l'aumento dell'area dell'orizzonte sotto mentite spoglie, lo stesso camuffamento che Hawking aveva dedotto nel 1974 dalla somiglianza matematica tra le leggi della meccanica dei buchi neri e quelle della termodinamica.

Il risultato di questo esperimento mentale può essere illustrato sinteticamente come segue: *l'entropia di un buco nero è il logaritmo del numero di modi*

in cui il buco nero può essere stato creato. Ciò significa che vi sono $10^{4,6x10^{78}}$ modi diversi di creare un buco nero di massa pari a 10 volte a quella del Sole la cui entropia sia $4,6x10^{78}$. Questa spiegazione dell'entropia era stata ipotizzata originariamente da Bekenstein nel 1972 e ne era stata data una prova molto astratta da Hawking e dal suo ex-studente Gary Gibbons nel 1977.

L'esperimento mentale mostra anche la seconda legge della termodinamica in azione. L'energia, il momento angolare e la carica gettati dentro l'atmosfera del buco possono avere qualsiasi forma; ad esempio, potrebbero essere l'aria della stanza chiusa dentro una busta che abbiamo incontrato in precedenza in questo capitolo quando eravamo alle prese con la seconda legge. Quando la busta viene gettata nell'atmosfera del buco, l'entropia dell'Universo esterno viene ridotta della quantità di entropia (aleatorietà) contenuta nella busta. Tuttavia, l'entropia dell'atmosfera del buco, e pertanto quella del buco, aumenta di una quantità maggiore dell'entropia contenuta nella busta, di modo che l'entropia totale del buco più quella dell'Universo esterno aumenta. La seconda legge della termodinamica è rispettata.

Quanto impiega un buco nero a evaporare e scomparire? La risposta dipende dalla massa del buco nero. Più il buco è grande, più la sua temperatura è bassa, quindi emette particelle meno energicamente ed evapora più lentamente. La durata totale della sua vita, secondo i calcoli effettuati da Don Page nel 1975 quando era al tempo stesso un allievo mio e di Hawking, è di $1,2x10^{67}$ anni se la massa del buco è due volte quella del Sole. La durata della vita del buco è proporzionale al cubo della sua massa, perciò un buco di 20 masse solari ha una vita di $1,2x10^{70}$ anni. Simili durate di vita sono talmente enormi rispetto all'età attuale dell'Universo, circa $1x10^{10}$ anni, che l'evaporazione è totalmente irrilevante per gli astrofisici. Ciononostante, l'evaporazione è stata molto importante per la comprensione dell'unione tra relatività generale e meccanica quantistica; grazie alla fatica fatta per capire l'evaporazione abbiamo appreso le leggi quantistiche dei campi nello spaziotempo curvo.

Dei buchi di massa molto inferiore a due Soli, se potessero esistere, evaporerebbero molto più rapidamente che non in 10^{67} anni. Buchi così piccoli non possono esistere nell'Universo attualmente perché la pressione di degenerazione e la pressione nucleare impediscono alle masse piccole di implodere, anche se li si comprimesse con tutta la forza di cui attualmente può disporre l'Universo (capitoli IV e V). Tuttavia, tali buchi avrebbero potuto formarsi nel Big Bang, quando la materia ha sperimentato densità, pressioni

e compressioni gravitazionali enormemente superiori a quelle di qualsiasi stella dell'era moderna.

I calcoli approfonditi di Hawking, Zel'dovich, Novikov e altri hanno dimostrato che dei piccoli grumi presenti nella materia emersa dal Big Bang potrebbero aver prodotto dei minuscoli buchi neri, se la materia di tali grumi avesse avuto un'equazione di stato debole (ossia se, a seguito della compressione, avesse presentato solo piccoli incrementi di pressione). Una potente compressione da parte di altra materia adiacente nell'Universo primigenio, come quella esercitata sul carbone da una potente morsa che lo trasforma in diamante, avrebbe potuto far implodere dei minuscoli grumi formando dei minuscoli buchi neri.

Un modo promettente di cercare questi minuscoli *buchi neri primordiali* consiste nel cercare le particelle da essi prodotte quando evaporano. Dei buchi neri che pesino meno di 500 miliardi di chilogrammi ($5x10^{14}$ grammi, il peso di una modesta montagna) dovrebbero ormai essere evaporati completamente, e dei buchi neri poco più pesanti dovrebbero stare ancora evaporando energicamente. Tali buchi neri hanno degli orizzonti all'incirca delle dimensioni di un nucleo atomico.

Un'ampia porzione dell'energia emessa nell'evaporazione di tali buchi dovrebbe attualmente viaggiare aleatoriamente per l'Universo sotto forma di raggi gamma (fotoni ad alta energia). Questi raggi gamma esistono, ma in quantità e con delle proprietà che possono facilmente essere spiegate in altri modi. L'assenza di raggi gamma in eccesso ci dice (in base ai calcoli di Hawking e Page) che attualmente non vi sono più di 300 buchi neri minuscoli che evaporano energicamente in ogni anno luce cubo di spazio; e ciò a sua volta ci dice che la materia nel Big Bang non può aver avuto un'equazione di stato estremamente debole.

Gli scettici sosterranno che l'assenza di raggi gamma in eccesso può avere un'altra interpretazione: forse nel Big Bang si erano formati molti piccoli buchi neri, ma noi fisici comprendiamo i campi quantistici nello spaziotempo curvo assai meno di quanto pensiamo, e pertanto inganniamo noi stessi credendo che i buchi neri evaporino. Io e i miei colleghi respingiamo questo scetticismo per via dell'apparente perfezione con cui le leggi standard dello spaziotempo curvo e le leggi standard dei campi quantistici si armonizzano fino a darci un corpus quasi unico di leggi per i campi quantistici nello spaziotempo curvo. Ciononostante, ci sentiremmo molto più a nostro agio se gli astronomi potessero trovare delle prove basate sulle osservazioni dell'evaporazione dei buchi neri.

XIII. DENTRO I BUCHI NERI

Dove i fisici, combattendo con le equazioni di Einstein,
cercano di svelare il mistero di cosa si trovi dentro un buco nero:
una via per entrare in un altro Universo?
Una singolarità con una marea gravitazionale infinita?
La fine dello spazio e del tempo e la nascita di una schiuma quantistica?

Singolarità e altri universi

Cosa c'è dentro un buco nero?

Come possiamo fare per saperlo e perché dovrebbe importarci? Nessun segnale potrà mai fuoriuscire dal buco per darci la risposta. Nessun intrepido esploratore che entrasse nel buco per scoprirlo potrebbe mai tornare a riferircelo. Qualunque cosa si trovi nel centro del buco non potrà mai spuntarne fuori e influenzare il nostro Universo in nessun modo.

È difficile che risposte simili possano soddisfare la curiosità umana. Ancor più quando si dispone di strumenti in grado di darci la risposta: le leggi della fisica.

John Archibald Wheeler ci ha insegnato quanto sia importante la ricerca per arrivare a conoscere il centro di un buco nero. Negli anni Cinquanta egli fece della «questione dello stato finale» di un'implosione gravitazionale il Santo Graal dei fisici teorici, una questione che potrebbe svelarci i particolari dell'impetuosa unione della relatività generale e della meccanica quantistica. Quando Robert J. Oppenheimer affermava che lo stato finale è nascosto alla vista da un orizzonte, Wheeler dissentiva (capitolo VI), non da ultimo, io sospetto, per paura di perdere la possibilità di osservare questa impetuosa unione in azione dal di fuori dell'orizzonte.

Dopo aver accettato l'orizzonte, Wheeler restò convinto del fatto che capire i buchi neri era un'impresa degna della ricerca del Santo Graal. Come gli sforzi ingaggiati per comprendere l'evaporazione dei buchi neri ci hanno aiutato a scoprire un'unione parziale tra la meccanica quantistica e la relati-

vità generale (capitolo XII), tentare di capire come è fatto il centro di un buco nero potrebbe portarci a realizzare un'unione completa tra i due insiemi di leggi; potrebbe farci arrivare a conoscere il corpus completo delle leggi della gravità quantistica. E forse nella natura del buco risiedono le chiavi di altri misteri dell'Universo: vi è una somiglianza tra il «big crunch», la grande implosione, in cui fra qualche eone il nostro Universo potrebbe morire, e l'implosione della stella che crea il nucleo di un buco nero. Comprendere effettivamente l'uno potrebbe aiutarci a gettare luce sull'altro.

Per trentacinque anni i fisici sono andati alla ricerca del Santo Graal di Wheeler, ma con scarso successo. Non sappiamo ancora con certezza cosa si trovi al centro di un buco nero, e gli sforzi compiuti per scoprirlo non ci hanno ancora rivelato con chiarezza le leggi della gravità quantistica. Ma abbiamo imparato molto, non da ultimo che qualsiasi cosa si trovi al centro di un buco nero è davvero intimamente connessa con le leggi della gravità quantistica.

Questo capitolo descrive solo alcuni dei più interessanti progressi e contraddizioni incontrati nella ricerca del Santo Graal di Wheeler e su quali aspetti essa ci ha fatto fare dei passi avanti.

La prima, esitante, risposta alla domanda «cosa c'è dentro un buco nero?» è stata data da J. Robert Oppenheimer e Hartland Snyder nel loro classico del 1939 relativo al calcolo dell'implosione di una stella sferica (capitolo VI). Sebbene la risposta fosse contenuta nelle loro equazioni, Oppenheimer e Snyder decisero di non illustrarla. Forse temevano che non avrebbe fatto altro che continuare ad alimentare la controversia sulla loro previsione secondo cui la stella quando implode «si isola dal resto dell'Universo» (ossia, crea un buco nero). Forse l'innato conservatorismo scientifico di Oppenheimer, la sua scarsa propensione alla speculazione lo hanno trattenuto. Qualunque sia stata la ragione, non dissero niente. Ma le loro equazioni parlavano da sole.

Dopo aver creato l'orizzonte di un buco nero attorno sé, dicevano le loro equazioni, la stella sferica continua a implodere, inesorabilmente, fino a raggiungere una densità infinita e zero volume, dopo di che crea una *singolarità spaziotemporale* nella quale si fonde.

Una singolarità è una regione in cui, secondo le leggi della relatività generale, la curvatura dello spazio tempo diventa infinitamente ampia e lo spaziotempo cessa di esistere. Dato che la marea gravitazionale è una manifestazione della curvatura dello spaziotempo (capitolo II), una singolarità è anche

una regione dalla marea gravitazionale infinita, una regione in cui la gravità tende tutti gli oggetti infinitamente in alcune direzioni e li comprime infinitamente in alcune altre.

È possibile concepire varie tipologie differenti di singolarità dello spaziotempo, in ognuna delle quali gli effetti della marea gravitazionale prendono una forma particolare, e nel corso di questo capitolo ne incontreremo alcune.

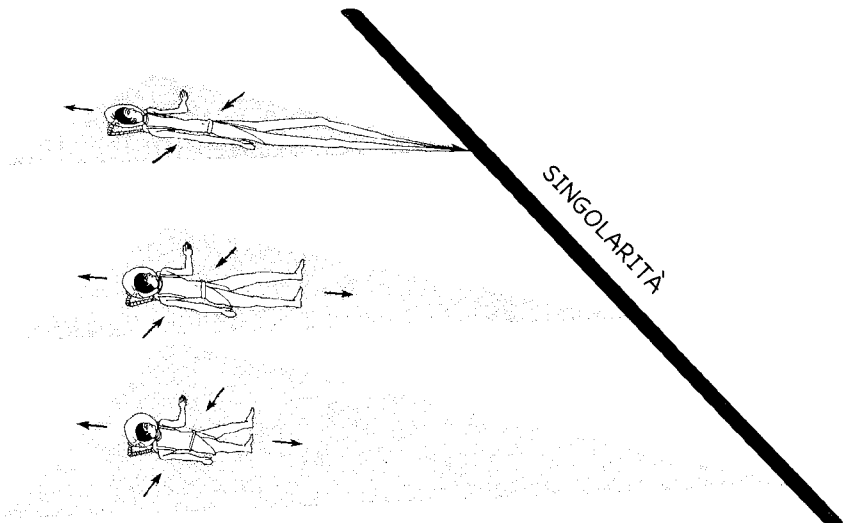
La singolarità prevista dai calcoli di Oppenheimer e Snyder è molto semplice. La sua marea gravitazionale ha essenzialmente la stessa forma di quelle della Terra, del Sole o della Luna, ovvero, la stessa forma di marea gravitazionale che crea le maree degli oceani terrestri (scheda 2.5): la singolarità tende tutti gli oggetti radialmente (lungo la direzione che va verso di sé e in direzione opposta) e comprime tutti gli oggetti trasversalmente.

Immaginate un astronauta che precipiti in piedi dentro il tipo di buco nero descritto dalle equazioni di Oppenheimer e Snyder. Più il buco è grande, più a lungo può sopravvivere, quindi ai fini della massima longevità ipotizziamo che il buco sia il più grande che possa risiedere al centro dei quasar (capitolo IX): 10 miliardi di masse solari. A un certo punto, l'astronauta, precipitando, attraversa l'orizzonte ed entra nel buco circa 20 ore prima della sua morte, ma mentre entra è ancora troppo lontano dalla singolarità per avvertirne la marea gravitazionale. Mentre continua a precipitare sempre più veloce, avvicinandosi sempre più alla singolarità, la marea gravitazionale diventa sempre più forte finché, appena un secondo prima di raggiungerla, comincia ad avvertire che la singolarità gli tende in direzione opposta i piedi e la testa e gli comprime i fianchi (l'illustrazione in fondo alla figura 13.1). All'inizio la tensione e la compressione sono solo leggermente fastidiose, ma continuano ad aumentare finché, pochi centesimi di secondo prima della singolarità (illustrazione al centro della figura), non diventano così forti che le sue ossa e la sua carne non possono più resistere. Il suo corpo viene smembrato e muore. Negli ultimi centesimi di secondo la tensione e la compressione continuano ad aumentare, e quando egli raggiunge la singolarità esse diventano infinitamente forti, e agiscono prima sui suoi piedi, poi sul tronco e poi sulla testa; il suo corpo viene teso all'infinito e infine, secondo la relatività generale, si fonde e diviene parte della singolarità.

È assolutamente impossibile per l'astronauta procedere attraverso la singolarità e uscire dall'altra parte perché, secondo la relatività generale, non c'è un'«altra parte». Lo spazio, il tempo e lo spaziotempo cessano di esistere nella singolarità. Essa è un bordo affilato, come il bordo di un foglio di carta. Oltre il bordo del foglio non c'è carta; al di là della singolarità non c'è spa-

ziotempo. Ma la somiglianza finisce qui. Una formica sul foglio può andare dritta fino al bordo e tornare indietro, ma niente può tornare indietro dalla singolarità; tutti gli astronauti, le particelle, le onde, qualsiasi cosa che la tocchi viene immediatamente distrutta, secondo le leggi della relatività generale di Einstein.

Il meccanismo della distruzione non è del tutto chiaro nella figura 13.1 perché ignora la curvatura dello spazio. In realtà, quando il corpo dell'astronauta raggiunge la singolarità viene davvero teso all'infinito e compresso trasversalmente fino a ridursi a zero. L'estrema curvatura dello spazio nei pressi della singolarità gli consente di allungarsi all'infinito senza tirar fuori la testa

13.1 – Diagramma spaziotemporale raffigurante un astronauta che precipita in piedi nella singolarità al centro di un buco nero secondo i calcoli di Oppenheimer e Snyder. Come in tutti i precedenti diagrammi spaziotemporali (ad esempio, nella figura 6.7) manca una dimensione spaziale; per questo l'astronauta appare bidimensionale anziché tridimensionale. In questo diagramma la singolarità è inclinata anziché in posizione verticale come nella figura 6.7 e nella scheda 12.1 perché il tempo riportato in verticale e lo spazio in orizzontale qui sono molto diversi. In questo diagramma, essi sono lo spazio e il tempo dell'astronauta, negli altri erano quelli di Finkelstein.

dall'orizzonte. La testa e i piedi vengono attirati entrambi nella singolarità, ma sono ormai infinitamente distanti.

Non solo un astronauta viene teso e compresso infinitamente nella singolarità, secondo i calcoli di Oppenheimer e Snyder; tutte le forme di materia vengono tese e compresse infinitamente, perfino i singoli atomi; perfino gli elettroni, i protoni e i neutroni che costituiscono gli atomi; perfino i quark che costituiscono i protoni e i neutroni.

L'astronauta può sfuggire in qualche modo a questa tensione e a questa compressione infinite? No, non dopo aver attraversato l'orizzonte. Secondo le equazioni di Oppenheimer e Snyder, la gravità è talmente forte (lo spaziotempo è deformato con tale forza) che il tempo stesso (il tempo di ciascuno) affluisce nella singolarità[1]. Poiché l'astronauta, come chiunque altro, deve muoversi inesorabilmente in avanti nel tempo, egli viene trascinato con il flusso del tempo dentro la singolarità. A prescindere da cosa faccia, da quanta potenza dia al suo propulsore, l'astronauta non può evitare la tensione e la compressione infinite della singolarità.

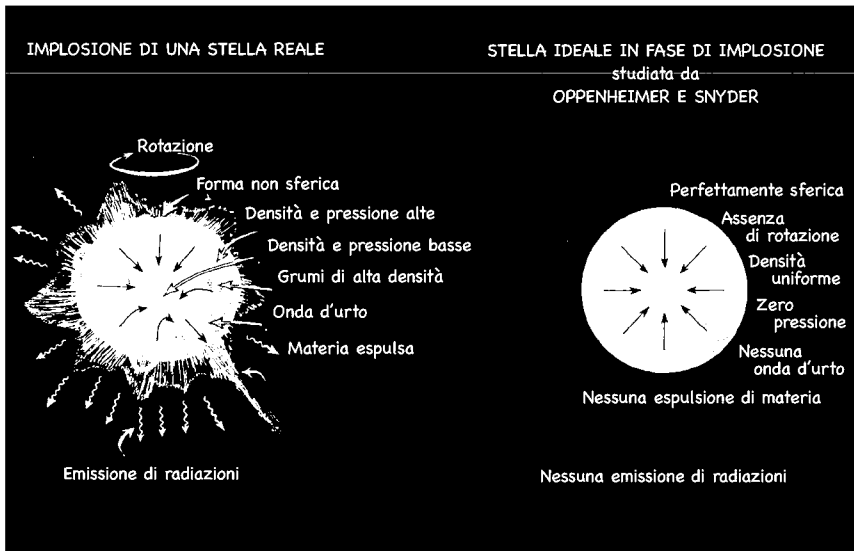
Ogni volta che noi fisici vediamo che le nostre equazioni prevedono qualcosa di infinto diventiamo diffidenti. Quasi niente nel nostro Universo reale diventa mai davvero infinito (crediamo). Pertanto, un'infinità è quasi sempre indice di qualche errore.

La tensione e la compressione infinite della singolarità non erano un'eccezione. I pochi fisici che hanno studiato le pubblicazioni di Oppenheimer e Snyder durante gli anni Cinquanta e i primi anni Sessanta ritenevano unanimemente che vi fosse qualcosa di sbagliato. Ma l'unanimità finiva qui.

Un gruppo, capeggiato energicamente da Wheeler, vedeva nella tensione e compressione infinite un messaggio inequivocabile del fatto che la relatività generale cessava di essere valida all'interno di un buco nero, al termine dell'implosione stellare. La meccanica quantistica dovrebbe impedire alla marea gravitazionale di diventare davvero infinita in quel punto, affermava Wheeler, ma come? Per ottenere la risposta, sosteneva Wheeler, bisognerebbe unificare le leggi della meccanica quantistica con le leggi della marea gravitazionale, ossia, con le leggi dello spaziotempo curvo derivanti dalla relatività generale di Einstein. La progenie di quell'unione, le leggi della gravità quantistica, deve governare la singolarità, affermava Wheeler; e queste nuove leggi potrebbero creare nuovi fenomeni fisici all'interno dei buchi neri, fenomeni mai incontrati in precedenza.

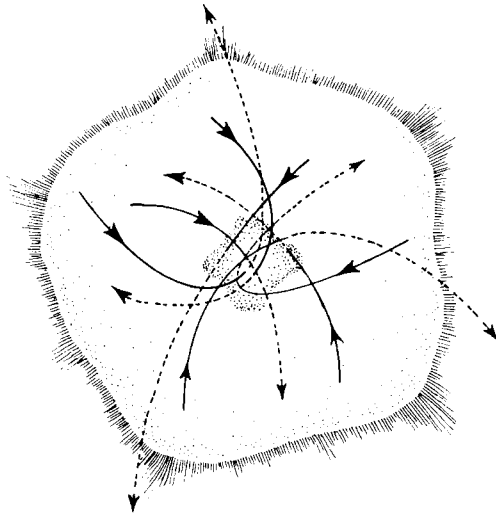
Un secondo gruppo capeggiato da Isaac Markovich Khalatnikov ed Evge-

ny Michailovich Lifshitz (membri dell'équipe di ricerca di Landau a Mosca) considerava la tensione e compressione infinite come un segnale del fatto che il modello astratto di stella in fase di implosione di Oppenheimer e Snyder non era credibile. Si ricordi che alla base dei loro calcoli Oppenheimer e Snyder ponevano il requisito che la stella sia perfettamente sferica e priva di rotazione, con densità uniforme, zero pressione, assenza di onde d'urto, di espulsione di materia e di emissione di radiazioni (figura 13.2). La singolarità dipendeva da queste semplificazioni estreme, sostenevano Khalatnikov e Lifshitz. Ogni stella reale presenta delle piccole deformazioni casuali (piccole difformità casuali della forma, della velocità, della densità e della pressione), e quando la stella implode, essi affermavano, *queste deformazioni diventeranno più marcate e arresteranno l'implosione prima che possa formarsi una singolarità.* Analogamente, affermavano Khalatnikov e Lifshitz, le deformazioni casuali, tra qualche eone, arresteranno il «big crunch» del nostro intero Universo, salvandolo dalla distruzione in una singolarità.

13.2 – (Identica alla figura 6.3) *A sinistra*: Fenomeni fisici in una stella in fase di implosione realistica. *A destra*: Le semplificazioni apportate da Oppenheimer e Snyder per poter calcolare l'implosione stellare. Per una illustrazione particolareggiata si veda il capitolo VI.

Khalatnikov e Lifshitz maturarono queste convinzioni nel 1961 chiedendosi se, secondo le leggi della relatività generale di Einstein, le singolarità siano *stabili rispetto a delle piccole perturbazioni.* In altre parole, si posero rispetto alle singolarità la stessa domanda che, come si è visto nel capitolo VII, era stata posta per i buchi neri: se nel risolvere l'equazione di campo di Einstein si alterano leggermente ma in modo casuale la forma della stella che implode o dell'Universo e la velocità, la densità e la pressione del suo materiale, e se inseriamo nel materiale delle piccole, ma casuali, quantità di radiazione gravitazionale, queste modifiche (queste *perturbazioni*) come influiranno sull'esito finale previsto dell'implosione?

Per l'orizzonte del buco nero, come si è visto nel capitolo VII, le perturbazioni non fanno alcuna differenza. La stella che sta implodendo e subisce una perturbazione forma ugualmente un orizzonte, e sebbene inizialmente esso sia deformato, tutte le sue deformazioni scompaiono presto sotto forma di radiazione lasciandosi dietro un buco nero completamente privo di «peli». In altre parole, l'orizzonte è *stabile* rispetto alle piccole perturbazioni.

Non è così per la singolarità al centro del buco nero o nella contrazione finale dell'Universo, dedussero Khalatnikov e Lifshitz. I loro calcoli sembravano indicare che le piccole perturbazioni casuali dovrebbero acquisire maggiori dimensioni quando la stella in fase di implosione cerca di creare una singolarità; esse diventerebbero in realtà così ampie da impedire alla singolarità di formarsi. Presumibilmente (malgrado i calcoli non possano dirlo con certezza), le perturbazioni arresteranno l'implosione e la trasformeranno in un'esplosione.

In che modo le perturbazioni potrebbero invertire il corso dell'implosione? Il meccanismo fisico non era del tutto chiaro nei calcoli di Khalatnikov e Lifshitz. Tuttavia, altri calcoli effettuati utilizzando le leggi della gravità di Newton, che sono molto più semplici di quelli basati sulle leggi di Einstein, forniscono degli indizi. Ad esempio (si veda la figura 13.3), se la gravità all'interno di una stella in fase di implosione fosse abbastanza debole da rendere precise le leggi di Newton, e se la pressione della stella fosse troppo bassa per essere rilevante, le piccole perturbazioni farebbero implodere atomi diversi verso punti leggermente diversi in prossimità del centro della stella. La maggior parte degli atomi in implosione mancherebbe il centro in una certa misura, oscillerebbe attorno al centro e tornerebbe a dirigersi verso l'esterno, trasformando in tal modo l'implosione in un'esplosione. Sembrava concepibile che, anche se le leggi della gravità di Newton perdevano validità all'interno di un buco nero, qualche meccanismo analogo potesse convertire l'implosione in un'esplosione.

13.3 – Un meccanismo per convertire l'implosione di una stella in un'esplosione quando la gravità è abbastanza bassa da rendere valide le leggi di Newton e la pressione interna è abbastanza bassa da essere irrilevante. Se la stella in fase di implosione è leggermente deformata («perturbata»), i suoi atomi implodono verso punti leggermente diversi, oscillano l'uno intorno all'altro e poi tornano a dirigersi verso l'esterno.

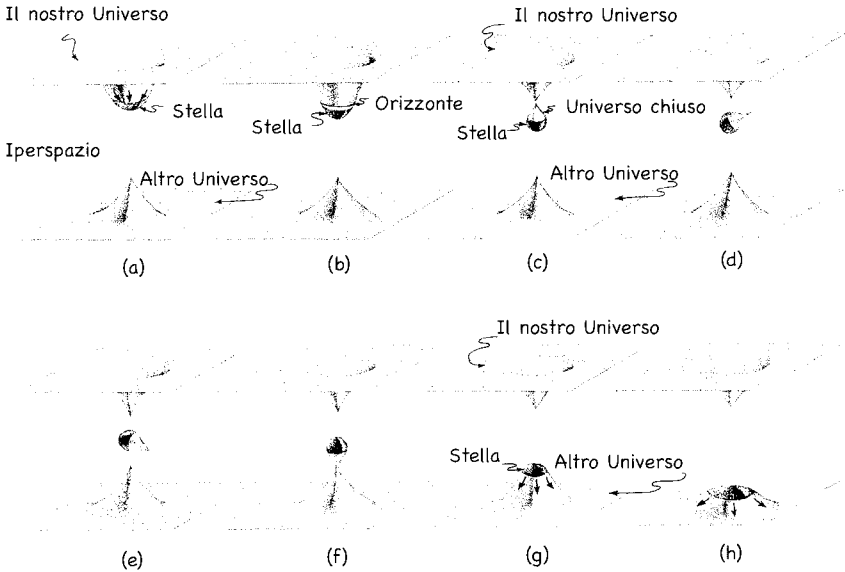
Entrai nell'équipe di ricerca di John Wheeler in quanto dottorando nel 1962, poco dopo che Khalatnikov e Lifshitz avevano pubblicato i loro calcoli, e poco dopo che Lifshitz e Landau raccogliessero tali calcoli e la relativa conclusione contraria all'esistenza di una singolarità in un famoso libro di testo, *Teoria dei campi*. Ricordo chiaramente Wheeler che incoraggiava la sua équipe a studiare i calcoli. Se sono giusti, avranno conseguenze profonde, ci disse. Purtroppo i calcoli erano estremamente lunghi e complessi, i dettagli pubblicati erano troppo frammentari per permetterci di verificarli, e Khalatnikov e Lifshitz erano confinati al di là della cortina di ferro dell'Unione Sovietica; non potevamo quindi sederci a un tavolo e consultarci con loro a riguardo.

Ciononostante, cominciammo a contemplare la possibilità che l'Universo in implosione, una volta raggiunta una dimensione molto piccola, *potesse* «rimbalzare» e riesplodere in un nuovo Big Bang e, analogamente, che una stella in fase di implosione, dopo essere sprofondata all'interno del proprio orizzonte, *potesse* rimbalzare e riesplodere.

Ma dove avrebbe potuto andare la stella se fosse riesplosa? Di certo, nell'esplosione, non avrebbe potuto riattraversare l'orizzonte del buco nero. Le leggi della gravità di Einstein vietano a qualsiasi cosa (eccetto le particelle virtuali) di fuoriuscire dall'orizzonte. C'era tuttavia un'altra possibilità: la stella avrebbe potuto esplodere in qualche altra regione del nostro Universo, o perfino in un altro universo. La figura 13.4 illustra una simile implosione e riesplosione utilizzando una sequenza di diagrammi a incasso (i diagrammi a incasso, che sono abbastanza diversi dai diagrammi spaziotemporali, sono stati introdotti nelle figure 3.2 e 3.3).

Ogni diagramma della figura 13.4 raffigura lo spazio curvo del nostro Universo e lo spazio curvo di un altro universo, come superfici bidimensionali incassate in un iperspazio a più dimensioni [si ricordi che l'iperspazio è frutto dell'immaginazione dei fisici: noi, in quanto esseri umani, siamo costretti a vivere sempre nello spazio del nostro Universo (o, se potessimo raggiungerlo, nello spazio di un altro universo); non possiamo in nessun caso uscire da quegli spazi per entrare nel circostante iperspazio multidimensionale. L'iperspazio serve solo per aiutarci a visualizzare la curvatura dello spazio intorno alla stella che sta implodendo e al suo buco nero, e a visualizzare il modo in cui la stella può implodere nel nostro Universo e poi riesplodere in un altro].

Nella figura 13.4, i due universi sono simili a isole separate in un oceano e l'iperspazio è come l'acqua dell'oceano. Come non vi è collegamento terrestre tra le isole, non vi è una connessione spaziale tra i due universi.

La sequenza di diagrammi della figura 13.4 raffigura l'evoluzione della stella. La stella, nel nostro Universo, sta cominciando a implodere nel diagramma (a). In (b) ha formato l'orizzonte di un buco nero attorno a sé e continua a implodere. In (c) e (d) la materia altamente compressa della stella curva lo spazio strettamente intorno alla stella formando un piccolo universo chiuso che somiglia alla superficie di un pallone; questo nuovo, piccolo universo scivola fuori del nostro Universo e si muove, da solo, nell'iperspazio (qualcosa di analogo a degli indigeni di un'isola che costruiscono una piccola imbarcazione e si mettono a navigare per l'oceano). In (d) ed (e) il piccolo universo, con la stella dentro, si muove attraverso l'iperspazio dal nostro grande Universo fino all'altro grande universo (come la barca che naviga da

13.4 – Diagrammi a incasso raffiguranti un destino possibile (ma, come si vedrà nel prosieguo del capitolo, molto *improbabile*) della stella che implode e dà luogo a un buco nero. Gli otto diagrammi da (a) a (h) sono una sequenza di istantanee che mostra l'evoluzione della stella e la geometria dello spazio. La stella implode nel nostro Universo (a) e forma l'orizzonte di un buco nero attorno a sé (b). Poi, nelle profondità del buco la regione dello spazio che contiene la stella scivola fuori del nostro Universo e forma un piccolo universo chiuso senza collegamenti con altre cose (c). L'universo chiuso poi si muove attraverso l'iperspazio (d, e) e si salda a un altro grande universo (f), quindi la stella esplode all'esterno nell'altro universo (g, h).

un'isola all'altra). In (f) il piccolo universo si salda all'altro grande universo (come la barca che approda su un'isola) e continua a espandersi riversando fuori la stella. In (g) e (h) la stella esplode nell'altro universo.

Sono fastidiosamente consapevole del fatto che questo scenario suoni puramente fantascientifico. Tuttavia, come i buchi neri erano un prodotto naturale della soluzione di Schwarzschild dell'equazione di campo di Einstein (capitolo III), anche questo scenario è il prodotto naturale di un'altra solu-

zione trovata nel 1916-1918 da Hans Reissner e Gunnar Nordström ma da essi non compresa appieno. Nel 1960 due allievi di Wheeler, Dieter Brill e John Graves, decifrarono il significato fisico della soluzione di Reissner e Nordström e divenne rapidamente ovvio che con modesti cambiamenti tale soluzione avrebbe descritto l'implosione/esplosione della stella della figura 13.4. Questa stella differiva da quella di Oppenheimer e Snyder per un solo aspetto fondamentale: conteneva in sé abbastanza carica elettrica da produrre un intenso campo elettrico quando diveniva estremamente compatta, e tale campo elettrico sembrava in qualche modo responsabile della riesplosione della stella in un altro universo.

Esaminiamo a che punto era nel 1964 la ricerca del Santo Graal di Wheeler, la ricerca volta a scoprire il destino ultimo di una stella che implode e forma un buco nero:

1. Conosciamo una soluzione dell'equazione di Einstein (la soluzione Oppenheimer-Snyder) che prevede che, se la stella ha una forma molto semplificata, compresa una conformazione perfettamente sferica, creerà una singolarità dalla marea gravitazionale infinita al centro del buco, una singolarità che cattura, distrugge e ingoia qualsiasi cosa cada dentro il buco.
2. Conosciamo un'altra soluzione dell'equazione di Einstein (un'estensione della soluzione Reissner-Nordström) che prevede che, se la stella ha una forma molto semplificata un po' diversa, con forma sferica e carica elettrica, nelle profondità del buco nero la stella scivolerà fuori del nostro Universo, si salderà a un altro universo (o a una regione distante del nostro Universo) e vi riesploderà.
3. Era lungi dall'essere chiaro quale delle due soluzioni, ammesso che una lo fosse, fosse «stabile rispetto a piccole perturbazioni casuali» e pertanto candidata a verificarsi nel nostro Universo reale.
4. Khalatnikov e Lifshitz, tuttavia, affermavano di aver provato che le singolarità sono *sempre* instabili rispetto alle piccole perturbazioni, e che perciò non si producono mai, e pertanto la singolarità di Oppenheimer-Snyder non si sarebbe mai verificata nel nostro Universo reale.
5. A Princeton, almeno, regnava un certo scetticismo sull'affermazione di Khalatnikov-Lifshitz. Lo scetticismo può essere in parte dipeso dall'interesse che Wheeler nutriva per le singolarità, poiché esse avrebbero costituito un terreno per l'unione tra la relatività generale e la meccanica quantistica.

Il 1964 è stato un anno spartiacque. Era l'anno in cui Roger Penrose rivoluzionava gli strumenti matematici che usavamo per analizzare le proprietà dello spaziotempo. La sua rivoluzione è stata così importante e ha avuto un tale impatto sulla ricerca del Santo Graal di Wheeler che farò una digressione di qualche pagina per descrivere Penrose e la sua rivoluzione.

La rivoluzione di Penrose

Roger Penrose proveniva da una famiglia di medici inglesi; la madre era medico, il padre era un eminente professore di genetica umana all'University College di Londra, e i suoi genitori desideravano che almeno uno dei loro quattro figli seguisse le loro orme dedicandosi alla carriera medica. Il fratello maggiore di Roger, Oliver, era una causa persa; fin da molto giovane aveva deciso di dedicarsi alla fisica (e in effetti sarebbe diventato uno dei principali ricercatori al mondo nel campo della fisica statistica, lo studio del comportamento di grandi numeri di atomi che interagiscono tra loro). Il fratello più giovane di Roger, Jonathan, era anche lui una causa persa; tutto quello che voleva fare era giocare a scacchi (e in effetti sarebbe diventato campione inglese di scacchi per sette anni di fila). La sorella più piccola di Roger, Shirley, era troppo giovane, nel momento in cui Roger doveva decidere quale carriera intraprendere, per mostrare un'inclinazione verso una direzione qualsiasi (anche se alla fine avrebbe dato soddisfazione ai genitori diventando medico). Roger era pertanto la grande speranza dei suoi genitori.

All'età di sedici anni Roger, come tutti gli alunni della sua classe, ebbe un colloquio con il preside della scuola. Era tempo di decidere le materie degli ultimi due anni degli studi che precedevano il college. «Vorrei fare matematica, chimica e biologia», disse al preside. «No. Impossibile. Non puoi combinare la matematica e la biologia. O l'una o l'altra», sentenziò il preside. «D'accordo, allora farò matematica, chimica e fisica», disse Roger. Quando tornò a casa quella sera i suoi genitori andarono su tutte le furie. Accusarono Roger di frequentare delle cattive compagnie. La biologia era essenziale per la carriera medica, come poteva rinunciarvi?

Due anni dopo venne il momento di scegliere cosa studiare al college. «Io proposi di andare all'University College di Londra a studiare matematica», ricorda Roger. «Mio padre non approvò affatto la scelta. La matematica andava bene per chi non voleva fare nient'altro, ma non era la scelta giusta da fare per intraprendere una vera carriera». Roger insisté, e così suo padre si

Roger Penrose, ca 1964. (Fotografia di Godfrey Argent per la National Portrait Gallery of Britain e la Royal Society of London; per gentile concessione di Godfrey Argent].

adoperò affinché uno dei matematici del College lo sottoponesse a un test speciale. Il matematico invitò Roger a sfruttare l'intera giornata per il test e lo avvisò che probabilmente sarebbe riuscito a risolvere solo uno o due dei problemi. Quando Roger risolse in poche ore tutti e dodici i problemi, suo padre si arrese. Roger avrebbe studiato matematica.

Inizialmente, Roger non aveva intenzione di applicare la matematica alla fisica. Ciò che lo interessava era la matematica pura. Ma venne sedotto.

La seduzione cominciò nel 1952 quando Roger, studente universitario ventiquattrenne a Londra, udì una serie di programmi radio di Fred Hoyle sulla cosmologia. Erano delle trasmissioni affascinanti, stimolanti, e un po' disorientanti. Alcune delle cose che diceva Hoyle non avevano molto senso. Un giorno Roger prese il treno per Cambridge e andò a fare visita a suo fratello Oliver, che vi studiava fisica. Alla fine della giornata, dopo aver cenato al Kingswood, Roger scoprì che Dennis Sciama, il compagno di stanza di Oliver,

stava studiando la teoria dello stato stazionario dell'Universo di Bondi-Gold-Hoyle. Che meraviglia! Forse Sciama poteva dissipare la confusione di Roger. «Hoyle dice che, secondo la teoria dello stato stazionario, l'espansione dell'Universo spingerà una galassia distante fuori della vista; la galassia si sposterà nella parte non osservabile del nostro Universo. Ma non capisco come possa accadere una cosa del genere». Roger tirò fuori una penna e cominciò a tracciare un diagramma spaziotemporale su un tovagliolo. «Questo diagramma mi fa pensare che la galassia diventerà sempre più indistinta, sempre più rossa, ma non scomparirà mai del tutto. Dove sbaglio?».

Sciama era sbigottito. Non aveva mai visto tanta efficacia in un diagramma spaziotemporale. Penrose aveva ragione; Hoyle doveva avere torto. Cosa ancor più importante, il fratellino di Oliver era un fenomeno.

Dennis Sciama avviò così con Roger Penrose lo schema che avrebbe continuato a seguire con i suoi studenti negli anni Sessanta (Stephen Hawking, George Ellis, Brandon Carter, Martin Rees e altri; si veda il capitolo VII). Egli trascinò Penrose in lunghe discussioni, sessioni di molte ore, sulle cose eccitanti che accadevano nella fisica. Sciama era informato su tutte le ricerche in corso; trasmise a Penrose il suo entusiasmo, l'eccitazione per tutto quello che stava succedendo. Penrose rimase subito catturato. Avrebbe terminato il suo Ph.D. in matematica, ma da allora in poi a guidarlo sarebbe stata la ricerca della comprensione dell'Universo. Egli avrebbe passato i decenni seguenti con un piede saldamente piantato nella matematica, e l'altro nella fisica.

Le nuove idee spesso arrivano nei momenti più strani, quando uno meno se le aspetta. Suppongo che sia perché arrivano dal subconscio, che agisce in modo più efficace quando la parte conscia della mente è a riposo. Un buon esempio di ciò è la scoperta che le aree degli orizzonti dei buchi neri devono sempre aumentare, fatta da Stephen Hawking nel 1970 mentre si stava preparando per andare a letto (capitolo XII). Un altro esempio è la scoperta fatta da Roger Penrose che ha cambiato la nostra visione di cosa vi sia dentro un buco nero.

Un giorno di fine autunno del 1964, Penrose, all'epoca professore al Birkbeck College di Londra, si stava recando a piedi nel suo ufficio con un amico, Ivor Robinson. Durante l'anno che era passato, da quando erano stati scoperti i quasar e gli astronomi avevano cominciato a ipotizzare che fossero alimentati dall'implosione stellare (capitolo IX), Penrose aveva tentato di scoprire se le singolarità fossero create da stelle in fase di implosione realistiche e deformate in modo casuale. Mentre camminava e parlava con Robinson, il

suo subconscio rimuginava sulle tessere del mosaico, con le quali la sua mente cosciente si era dibattuta per molte ore.

Come ricorda Penrose: «La mia conversazione con Robinson si interruppe momentaneamente mentre attraversavamo una strada e si riannodò sul lato opposto. Evidentemente, in quei pochi istanti, mi venne un'idea, ma la conversazione che seguì la cancellò dalla mia mente! Più tardi, dopo che Robinson se n'era andato, tornai nel mio ufficio. Ricordo di aver provato una strana sensazione di esaltazione che non avrei saputo spiegare. Cominciai a ripassare mentalmente tutte le cose che erano successe durante il giorno nel tentativo di scoprire cosa aveva provocato quell'esaltazione. Dopo aver eliminato molte possibilità inadeguate, mi venne infine in mente che poteva essere accaduto mentre attraversavo quella strada».

Era un pensiero elegante, diverso da qualsiasi cosa vista fino a quel momento nella fisica relativistica. Penrose vi lavorò con cura nelle settimane seguenti, osservandolo da un lato e dall'altro, limando i dettagli e rendendolo il più concreto e matematicamente preciso che poteva. Con tutti i particolari in mano, scrisse un breve articolo per la rivista «Physical Review Letters», in cui descriveva la questione delle singolarità nell'implosione stellare e poi dimostrava un teorema matematico.

Il teorema di Penrose diceva grosso modo questo: supponiamo che una stella, di qualsiasi tipo, imploda fino al punto che la sua gravità diviene abbastanza forte da formare un *orizzonte apparente*, ossia abbastanza forte da trascinare indietro i raggi di luce che tentano di fuoriuscirne (scheda 12.1). Una volta accaduto questo, niente può impedire alla gravità di aumentare tanto da creare una singolarità. Di conseguenza (poiché i buchi neri hanno sempre degli orizzonti apparenti), *ogni buco nero deve avere una singolarità al suo interno.*

La cosa più stupefacente di questo *teorema della singolarità* era la vasta portata della sua efficacia. Essa valeva non solo per i modelli semplificati di stelle in fase di implosione dotate di speciali proprietà semplificate (come quelle di essere perfettamente sferiche o di non avere la minima pressione), né solo per le stelle con deformazioni iniziali piccole. Essa valeva per ogni stella in fase di implosione immaginabile e quindi, indubitabilmente, anche per le stelle reali che implodono presenti nel nostro Universo reale.

Il teorema della singolarità di Penrose doveva la sua efficacia sorprendente a un nuovo strumento matematico che egli utilizzò nella sua dimostrazione, uno strumento che nessun fisico aveva mai usato prima nei calcoli sullo spaziotempo curvo, ossia nei calcoli relativistici generali: la *topologia*.

La topologia è un ramo della matematica che si occupa dei modi qualitativi in cui le cose sono connesse le une con le altre o con se stesse. Ad esempio, una tazza di caffè e una ciambella «hanno la stessa topologia» perché (se sono entrambi fatti di plastilina) possiamo deformare l'una nell'altra in modo omogeneo e continuo senza romperla, ossia, senza modificare nessuna connessione (figura 13.5a). Invece una sfera ha una topologia diversa da una ciambella; per deformare una sfera in una ciambella dobbiamo aprirci un buco dentro, modificando il modo in cui è connessa con se stessa (figura 13.5b).

La topologia si occupa *solo* delle connessioni e *non* delle forme, delle dimensioni o delle curvature. Ad esempio, la ciambella e la tazza di caffè hanno forme e curvature molto diverse, ma hanno la stessa topologia.

Noi fisici, prima del teorema della singolarità di Penrose, ignoravamo la topologia perché ci fissavamo sul fatto che la *curvatura* dello spaziotempo è il concetto centrale della relatività generale, e la topologia non può dirci nulla sulla curvatura (in effetti, dato che il teorema di Penrose era basato così fortemente sulla topologia, non ci diceva niente sulla curvatura della singolarità, cioè niente sui dettagli della sua marea gravitazionale. Il teorema ci diceva semplicemente che da qualche parte dentro il buco nero, lo spaziotempo finisce e qualsiasi cosa che arrivi in quel punto viene distrutta. *Come* venisse distrutta rientrava nell'ambito della curvatura; *che* venisse distrutta – che vi fosse una fine allo spaziotempo – rientrava nell'ambito della topologia).

13.5 – Tutti i seguenti aspetti hanno a che fare con la natura della connessione tra punti; ossia, sono aspetti topologici. (a) È possibile deformare una tazza da caffè (a sinistra) e una ciambella (a destra) l'una nell'altra continuamente e omogeneamente senza romperle, in altre parole, senza cambiare la natura qualitativa di nessuna delle connessioni tra i punti. Perciò esse hanno la stessa topologia. (b) Per deformare una sfera (sinistra) in una ciambella (destra) bisogna aprirvi un buco. (c) Lo spaziotempo illustrato qui ha due margini affilati [analoghi allo strappo in (b)]: un margine dove il tempo comincia (analogo al Big Bang che ha dato inizio al nostro Universo) e uno in cui il tempo finisce (analogo al «big crunch»). Si può anche concepire un universo che è sempre esistito e sempre esisterà; lo spaziotempo di un simile universo non avrebbe limiti. (d) La regione dello spaziotempo annerita è l'interno di un buco nero; la regione bianca è l'esterno (si veda la scheda 12.1). I punti all'interno non possono inviare alcun segnale ai punti all'esterno.

Se solo noi fisici, prima di Penrose, avessimo guardato al di là della curvatura, ci saremmo accorti che la relatività *affronta* domande che hanno a che fare con la topologia, domande come «lo spaziotempo ha una fine (vi è un margine al di là del quale lo spaziotempo cessa di esistere)?» (figura 13.5c) e «quali regioni dello spaziotempo possono inviarsi reciprocamente segnali e quali no?» (figura 13.5d). La prima di queste domande topologiche è fondamentale per le singolarità; la seconda è fondamentale per la formazione e l'esistenza dei buchi neri e anche per la cosmologia (la struttura su vasta scala e l'evoluzione dell'Universo).

Queste questioni topologiche sono talmente importanti, e gli strumenti matematici della topologia le trattano in modo così efficace che, introducendoci alla topologia, Penrose ha innescato una rivoluzione nella nostra ricerca.

Partendo dalle feconde idee di Penrose, dalla metà alla fine degli anni Settanta, lo stesso Penrose, Hawking, Robert Geroch, George Ellis e altri fisici hanno creato una serie molto efficace di strumenti che combinano topologia e geometria per effettuare i calcoli legati alla relatività generale, strumenti oggi chiamati *metodi globali*. Con questi metodi Hawking e Penrose nel 1970 hanno dimostrato, senza ipotesi semplificatrici, che il nostro Universo deve aver avuto una singolarità spaziotemporale all'inizio della sua espansione dovuta al Big Bang, e che se un giorno collasserà di nuovo dovrà produrre una singolarità nel suo «big crunch». E usando questi metodi globali Hawking nel 1970 ha inventato il concetto di orizzonte assoluto di un buco nero e ha dimostrato che l'area della superficie degli orizzonti assoluti aumenta sempre (capitolo XII).

Torniamo ora al 1965, lo scenario era pronto per uno scontro poderoso. Isaac Khalatnikov e Evgeny Lifshitz a Mosca avevano dimostrato (o così credevano) che quando una stella reale, con deformazioni interne casuali, implode e forma un buco nero *non può* creare una singolarità al centro del buco, mentre Roger Penrose in Inghilterra aveva dimostrato che ogni buco nero *deve* avere una singolarità al centro.

La sala conferenze aveva 250 posti ed era stracolma quando Isaac Khalatnikov si alzò e prese la parola. Era un caldo giorno d'estate del 1965 e i più importanti relativisti del mondo si erano riuniti a Londra per la terza conferenza internazionale sulla relatività generale e la gravitazione. Era la prima opportunità per Isaac Khalatnikov e Evgeny Lifshitz di esporre in una simile riunione internazionale i particolari della loro prova che i buchi neri non contengono singolarità.

Il permesso di viaggiare al di là della cortina di ferro veniva concesso e ritirato in maniera relativamente capricciosa nell'Unione Sovietica nei decenni intercorsi tra la morte di Stalin e l'era di Gorbacev. Lifshitz, pur essendo ebreo, aveva viaggiato abbastanza liberamente negli anni Cinquanta, ma ora era finito in una lista nera e vi sarebbe rimasto fino al 1976. Khalatnikov aveva due svantaggi; era ebreo e non era mai stato all'estero (il permesso per il primo viaggio era estremamente difficile da ottenere). Tuttavia, dopo un'accesa battaglia, compresa una telefonata in suo nome da parte del vicepresidente dell'Accademia delle Scienze, Nikolai Nikolaevich Semenov, al Comitato centrale del Partito Comunista, Khalatnikov aveva finalmente ottenuto il permesso di venire a Londra.

Mentre parlava nella sala conferenze gremita, trascinandosi dietro un microfono, Khalatnikov coprì di equazioni la lavagna che occupava la stanza in tutta la sua larghezza per quindici metri. I suoi non erano metodi topologici; erano i metodi standard ricchi di equazioni che i fisici avevano usato per decenni nell'analisi della curvatura dello spaziotempo. Khalatnikov dimostrò matematicamente che le perturbazioni casuali devono aumentare quando una stella implode. Ciò significava, egli sosteneva, che se l'implosione deve dare luogo a una singolarità, essa deve presentare delle deformazioni completamente casuali nella curvatura del suo spaziotempo. Poi descrisse come lui e Lifshitz avessero cercato fra tutti i tipi di singolarità consentiti dalle leggi della relatività generale una che presentasse deformazioni della curvatura completamente casuali. Mostrò, matematicamente, un tipo di singolarità dopo l'altro; elencò e descrisse i tipi di singolarità quasi *ad nauseam*. Fra essi nessuno aveva deformazioni completamente casuali. Pertanto, concluse, chiudendo il suo intervento di quaranta minuti, una stella che implode caratterizzata da perturbazioni causali non può produrre una singolarità. Le perturbazioni devono salvare la stella dalla distruzione.

Quando gli applausi terminarono, Charles Misner, uno dei più brillanti exstudenti di Wheeler, saltò su e controbatté strenuamente. In maniera frenetica, energica e parlando come una mitragliatrice, Misner descrisse il teorema che Penrose aveva dimostrato qualche mese prima. Se il teorema di Penrose era giusto, quello di Khalatnikov e Lifshitz doveva essere sbagliato.

La delegazione sovietica era confusa e irritata. L'inglese di Misner era troppo rapido da seguire e, dato che il teorema di Penrose si basava su argomenti topologici estranei agli esperti di relatività, i sovietici lo guardavano con sospetto. Invece, l'analisi di Khalatnikov e Lifshitz si basava su metodi collaudati. Penrose, essi affermavano, probabilmente si sbagliava.

Negli anni successivi esperti di relatività dell'Est e dell'Ovest scandagliarono a fondo l'analisi di Penrose e quella di Khalatnikov e Lifshitz. A un primo sguardo, entrambe le analisi apparivano sospette, entrambe presentavano potenziali difetti pericolosi. Tuttavia, gradualmente, quando cominciarono a padroneggiare ed estendere le tecniche topologiche di Penrose, gli esperti si convinsero che quest'ultimo aveva ragione.

Nel settembre del 1969, mentre ero a Mosca come *visiting member* dell'équipe di Zel'dovich, Evgeny Lifshitz venne a trovarmi con un articolo appena scritto da lui e Khalatnikov. «Per piacere Kip, porta questo articolo in America per me e mandalo alla "Physical Review Letters"», mi chiese. Mi spiegò che qualsiasi articolo scritto in Unione Sovietica, a prescindere dal suo contenuto, veniva automaticamente classificato come segreto finché non veniva declassificato, operazione che richiedeva tre mesi. L'assurdo sistema sovietico permetteva a me e a qualsiasi altro visitatore straniero di leggere l'articolo a Mosca, ma il testo in sé non poteva uscire dal Paese senza essere passato al vaglio dei censori. Quell'articolo era troppo prezioso, troppo urgente

Una cena nell'appartamento di Isaac Khalatnikov a Mosca, giugno 1971. *In senso orario da sinistra*: Kip Thorne, John Wheeler, Evgeny Lifshitz, Isaac Khalatnikov, sua moglie Valentina Nikolaievna, Vladimir Belinsky e la figlia di Khalatnikov Eleanora. [Per gentile concessione di Charles W. Misner].

per un simile ridicolo ritardo. Lifshitz mi spiegò che esso conteneva la loro capitolazione, la confessione di aver sbagliato: Penrose aveva ragione e loro torto. Nel 1961 non erano stati capaci di trovare tra le soluzioni dell'equazione di campo di Einstein nessuna singolarità con deformazioni totalmente casuali; ma ora, spronati dal teorema di Penrose, insieme a un dottorando, Vladimir Belinsky, erano riusciti a trovarne una. Questa nuova singolarità, essi pensavano, doveva essere quella che metteva fine all'implosione delle stelle deformate casualmente e che un giorno avrebbe potuto distruggere il nostro Universo alla fine del «big crunch» [e in effetti, oggi, nel 1993, penso che probabilmente avessero ragione. Tornerò su questo punto di vista del 1993 e la natura della loro nuova singolarità BKL («Belinsky-Khalatnikov-Lifshitz») verso la fine di questo capitolo].

Per un fisico teorico è più che imbarazzante ammettere di aver pubblicato dei risultati che contenevano un grave errore. È umiliante per il proprio ego. E ne sapevo qualcosa. Nel 1966 avevo calcolato male le pulsazioni delle nane bianche e due anni dopo quell'errore ingannò per breve tempo gli astronomi facendo loro credere che le pulsar appena scoperte fossero delle nane bianche pulsanti. Il mio errore era abbastanza significativo da comparire in un editoriale della rivista inglese «Nature», un boccone amaro da ingoiare.

Per quanto errori del genere fossero imbarazzanti per un fisico americano o europeo, nell'Unione Sovietica erano assai peggiori. La posizione occupata nella scala gerarchica dagli scienziati era di particolare importanza nell'Unione Sovietica; essa determinava aspetti come la possibilità di viaggiare all'estero o di essere eletti all'Accademia delle Scienze, che a sua volta garantiva privilegi come il raddoppio o quasi dello stipendio e una limousine con autista a disposizione. Perciò la tentazione di cercare di nascondere o minimizzare gli errori quando si verificavano era più forte tra gli scienziati sovietici che tra quelli occidentali. Perciò la richiesta di aiuto di Lifshitz era tanto più impressionante. Non voleva che vi fossero ritardi nella diffusione della verità, e l'articolo era esplicito: confessava l'errore e annunciava che le future edizioni della *Teoria dei campi* (il manuale sulla relatività generale di Landau e Lifshitz) sarebbero state corrette in modo da eliminare l'affermazione che l'implosione non produce singolarità.

Nascosi il manoscritto tra le mie carte personali, lo portai in America e venne pubblicato. Le autorità sovietiche non se ne accorsero mai.

Come mai è stato un fisico inglese (Penrose) e non uno americano, francese o sovietico a introdurre i metodi topologici nella ricerca nel campo della rela-

tività? E perché durante tutti gli anni Sessanta i metodi topologici sono stati applicati con successo ed energia da altri fisici relativisti inglesi, mentre essi fecero presa molto più lentamente in America, in Francia, in Unione Sovietica e in qualsiasi altro posto?

La ragione, credo, stava nella preparazione universitaria dei fisici teorici inglesi. Essi solitamente si specializzano in matematica prima della laurea, svolgono ricerche per il Ph.D. nei Dipartimenti di matematica applicata o di matematica applicata e fisica teorica. In America, invece, gli aspiranti fisici teorici di solito si specializzano in fisica all'università e poi svolgono le ricerche per il Ph.D. nei Dipartimenti di fisica. Perciò i giovani fisici teorici inglesi venivano riversati in rami oscuri della matematica che non hanno trovato ancora grandi applicazioni in fisica, mentre hanno una debole preparazione di fondo sui temi «duri» della fisica, come il comportamento delle molecole, degli atomi e dei nuclei atomici. Invece, i giovani fisici teorici americani sanno poca matematica oltre a quella che hanno insegnato loro i professori di fisica, ma sono ben preparati nel campo degli atomi, delle molecole e dei nuclei.

In grande misura, noi americani abbiamo dominato la fisica teorica a partire dalla Seconda Guerra Mondiale e abbiamo imposto alla comunità mondiale dei fisici i nostri standard matematici scandalosamente bassi. La maggior parte di noi usa la matematica di cinquant'anni fa ed è incapace di comunicare con i matematici moderni. Con questa scarsa preparazione matematica era difficile per noi fisici americani assorbire e cominciare a usare i metodi topologici quando Penrose li introdusse.

I fisici teorici francesi, ancor più degli inglesi, hanno un'ottima preparazione in matematica. Ma durante gli anni Sessanta e Settanta i teorici relativisti francesi erano talmente invischiati nel rigore matematico (ossia nella perfezione) e diedero talmente poca importanza all'intuizione fisica, che hanno contribuito poco alla comprensione delle stelle in fase di implosione e dei buchi neri. La loro aspirazione al rigore li ha rallentati al punto che, pur conoscendo bene la matematica della topologia, non potevano competere con gli inglesi. Non ci provarono neppure; la loro attenzione era rivolta altrove.

Lev Davidovich Landau, cui si deve gran parte del vigore della fisica teorica sovietica dagli anni Trenta agli anni Sessanta, era anche una delle fonti della resistenza sovietica verso la topologia: Landau aveva trapiantato la fisica teorica dall'Europa occidentale all'Urss negli anni Trenta (capitolo V). Come strumento per questo trapianto egli aveva istituito una serie di esami di fisica teorica, definita il «minimo teorico», che bisognava superare per en-

trare nella sua équipe di ricerca. Chiunque, a prescindere dal suo retroterra formativo, poteva presentarsi e affrontare questi esami, ma pochi li superavano. Nei ventinove anni della sua storia (1933-1962) il minimo teorico è stato superato solo da quarantatré ricercatori, ma una considerevole parte di essi fece poi grandi scoperte nel campo della fisica.

Il minimo teorico di Landau comprendeva problemi appartenenti a *tutti* i rami della matematica che Landau riteneva importanti per la fisica teorica. La topologia non era tra questi. Il calcolo, le variabili complesse, la teoria qualitativa delle equazioni differenziali, la teoria dei gruppi e la geometria differenziale vi figuravano; tutte queste conoscenze sarebbero state necessarie nella carriera di un fisico. Ma la topologia non lo era. Landau non aveva

Evgeny Michailovich Lifshitz (*a sinistra*) e Lev Davidovich Landau (*a destra*) nella stanza di Landau nel suo appartamento presso l'Istituto per i problemi della fisica, al n. 2 di Vorobyevskoye Shosse, Mosca, 1954. [Per gentile concessione di Zinaida Ivanovna Lifshitz, moglie di Lifshitz].

nulla contro la topologia, semplicemente la ignorava, era irrilevante, e la sua visione di ciò che era irrilevante divenne quasi vangelo per la maggior parte dei fisici teorici sovietici dagli anni Quaranta agli anni Sessanta.

Questa visione venne trasmessa ai fisici teorici di tutto il mondo dalla serie di libri di testo chiamata *Corso di fisica teorica* scritti da Landau e Lifshitz. Essi divennero in tutto il mondo i testi di fisica più influenti del XX secolo e, come il minimo teorico di Landau, ignoravano la topologia.

Curiosamente, le tecniche topologiche vennero prematuramente introdotte nella ricerca sulla relatività molto prima del teorema di Penrose da due matematici sovietici di Leningrado: Aleksander Danilovich Aleksandrov e Revol't Ivanovich Pimenov. Nel periodo tra il 1950 e il 1959 Aleksandrov usò la topologia per dimostrare la «struttura causale» dello spaziotempo, ovvero, per studiare i rapporti tra regioni dello spaziotempo che possono comunicare tra loro e quelle che non possono. Era proprio il tipo di analisi topologica che alla fine avrebbe dato grandi frutti nella teoria dei buchi neri. Aleksandrov costruì un formalismo piuttosto efficace ed elegante, che a metà degli anni Cinquanta venne ripreso e portato ulteriormente avanti da Pimenov, un suo giovane collega.

Ma alla fine questa ricerca non portò a nulla. Aleksandrov e Pimenov avevano pochi contatti con fisici specializzati nella gravitazione. Questi avrebbero saputo quali tipi di calcolo erano utili e quali no. Avrebbero potuto dire ad Aleksandrov e a Pimenov che la singolarità del Big Bang o l'implosione gravitazionale delle stelle meritavano di essere esplorate con il loro formalismo. Ma nessun consiglio del genere doveva giungere a Leningrado; i fisici più importanti lavoravano a Mosca, seicento chilometri a sudovest di lì, e ignoravano tanto la topologia quanto i topologi. Il formalismo di Aleksandrov-Pimenov fiorì, e poi andò in letargo.

Un letargo reso obbligatorio dai destini dei due protagonisti: Aleksandrov divenne rettore dell'Università di Leningrado e non aveva tempo a sufficienza per ulteriori ricerche. Pimenov venne arrestato nel 1957 per aver fondato «un gruppo antisovietico», venne imprigionato per sei anni e dopo sette anni di libertà venne arrestato di nuovo ed esiliato per cinque anni nella Repubblica di Komi, milleduecento chilometri a est di Leningrado.

Non ho mai incontrato Aleksandrov o Pimenov, ma i racconti su quest'ultimo circolavano ancora a bassa voce nella comunità degli scienziati di Leningrado quando vi andai nel 1971, un anno dopo il suo secondo arresto. Le voci dicevano che Pimenov considerava il governo sovietico moralmente corrotto e, come molti giovani in America durante la guerra del Vietnam,

pensava che cooperando con il governo la corruzione avrebbe contagiato anche lui. L'unico modo di restare moralmente integri era la disobbedienza civile. In America ciò significava rifiutare l'arruolamento. Per Pimenov la disobbedienza civile significava *samizdat*, ovvero la pubblicazione clandestina di testi proibiti. Pimenov, si diceva, avrebbe ricevuto da alcuni amici un manoscritto la cui pubblicazione era stata proibita nell'Unione Sovietica, ne avrebbe battuto a macchina una mezza dozzina di copie con la carta carbone e le avrebbe distribuite ad altri amici, che avrebbero continuato il processo. Pimenov venne preso, riconosciuto colpevole e condannato a cinque anni di esilio nella Repubblica di Komi, dove lavorò come taglialegna ed elettricista in una segheria finché l'Accademia delle Scienze di Komi non approfittò del suo esilio e ne fece il direttore del suo Dipartimento di matematica.

Finalmente in grado di occuparsi nuovamente di matematica, Pimenov proseguì i suoi studi topologici dello spaziotempo. All'epoca la topologia si era consolidata come uno dei principali strumenti usati dai fisici nella ricerca sulla gravitazione, ma Pimenov rimase isolato dai principali fisici del suo Paese. Non esercitò mai l'influenza che in altre circostanze avrebbe potuto esercitare.

Roger Penrose, al contrario di Aleksandrov e Pimenov, vive con un piede saldamente piantato nella comunità dei matematici e l'altro nella fisica, e questo è stato un elemento importante del suo successo.

Approssimazioni

Si sarebbe potuto pensare che il teorema della singolarità di Penrose dirimesse per sempre la questione di cosa vi sia dentro un buco nero. Non è stato così. Esso ha invece sollevato una nuova serie di domande, con le quali i fisici si sono misurati, con scarso successo, a partire dalla metà degli anni Sessanta. Tali domande, e le migliori risposte che a esse possiamo dare nel 1993 (le nostre «migliori approssimazioni», sarebbe meglio dire) sono le seguenti:

1. Tutto ciò che entra in un buco nero viene necessariamente ingoiato dalla singolarità? Pensiamo di sì, ma non ne siamo certi;
2. All'interno del buco nero c'è un passaggio che conduce a un altro universo o a un'altra parte del nostro Universo? Molto probabilmente no, ma non ne siamo assolutamente certi;
3. Qual è il destino delle cose che cadono dentro la singolarità? Pensiamo

che ciò che vi cade quando il buco è abbastanza giovane venga distrutto dalla marea gravitazionale in modo violento e caotico prima che la gravità quantistica acquisti importanza. Tuttavia, ciò che cade dentro un buco nero antico potrebbe sopravvivere illeso fino a quando non dovrà confrontarsi con le leggi della gravità quantistica.

Nel corso del capitolo illustrerò in modo più dettagliato queste risposte.

Si ricordi che Oppenheimer e Snyder hanno dato una risposta chiara e inequivocabile alle nostre tre domande: quando il buco nero viene creato da una stella in fase di implosione sferica e altamente semplificata (1) tutto ciò che entra nel buco viene inghiottito dalla singolarità; (2) niente viaggia verso un altro universo o un'altra parte del nostro Universo; (3) avvicinandosi alla singolarità, qualsiasi cosa sperimenta un tensione radiale e una compressione trasversale infinitamente crescenti (figura 13.1) e viene pertanto distrutta.

Questa risposta era pedagogicamente utile; contribuiva a motivare calcoli che portavano a una maggiore conoscenza. Tuttavia, questa maggiore conoscenza (dovuta a Khalatnikov e Lifshitz) dimostrò che la risposta di Oppenheimer e Snyder è irrilevante per l'Universo reale in cui viviamo, perché le deformazioni casuali che si verificano in tutte le stelle reali modificheranno completamente l'interno del buco. L'interno descritto da Oppenheimer e Snyder è «instabile rispetto alle piccole perturbazioni».

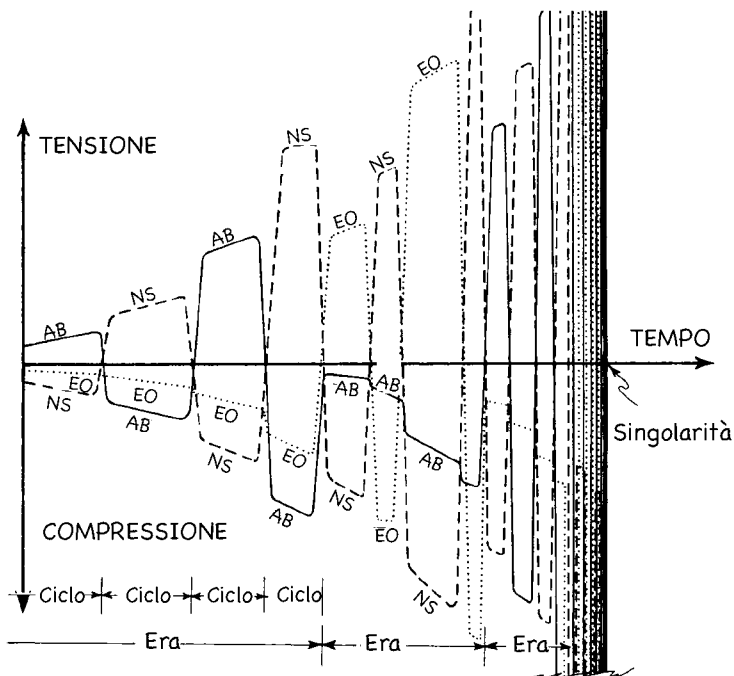
Il tipo di soluzione di Reissner-Nordström dell'equazione di campo di Einstein forniva a sua volta una risposta chiara e inequivocabile: quando un buco nero è creato da una stella particolare, molto semplificata, sferica e dotata di carica elettrica, la stella che implode e le altre cose che cadono nel buco possono viaggiare, attraverso un «piccolo universo chiuso», dall'interno del buco a un altro grande universo (figura 13.4).

Anche questa risposta era pedagogicamente utile (e ha portato acqua al mulino di molti scrittori di fantascienza). Tuttavia, come la previsione di Oppenheimer-Snyder, non ha niente a che vedere con l'Universo reale in cui viviamo perché esso è instabile rispetto alle piccole perturbazioni. Più specificamente, nel nostro Universo reale il buco nero viene continuamente bombardato da piccole fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto e da piccole quantità di radiazioni. Quando queste fluttuazioni e radiazioni cadono nel buco, la gravità le accelera dotandole di un'enorme energia, e poi esse colpiscono in maniera esplosiva e distruggono il piccolo universo chiuso appena prima che esso possa iniziare il suo viaggio. Ciò veniva ipotizzato da Penrose

nel 1968, e da allora è stato verificato da molti calcoli diversi effettuati da molti fisici diversi.

Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz hanno dato ancora un'altra risposta alle nostre domande, e questa, essendo del tutto stabile rispetto alle piccole perturbazioni è probabilmente la risposta «giusta», la risposta adatta ai buchi neri reali presenti nel nostro Universo: *la stella che forma il buco e ogni cosa che vi cade dentro quando esso è di recente formazione viene fatta a pezzi dalla marea gravitazionale di una singolarità BKL* (ossia il tipo di singolarità scoperto da Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz, in quanto soluzione dell'equazione di Einstein, dopo che Penrose li aveva convinti che le singolarità devono essere presenti dentro i buchi neri).

La marea gravitazionale di una singolarità BKL è radicalmente diversa da quella della singolarità di Oppenheimer-Snyder. Quest'ultima tende e comprime un astronauta (o qualsiasi altra cosa) che vi precipita dentro in modo costante ma crescente; la tensione è sempre radiale e la compressione sempre trasversale, e l'intensità della tensione e della compressione cresce costantemente e omogeneamente (figura 13.1). La singolarità BKL, invece, è un po' come la macchina della pasta filante delle caramelle che si vede a volte nei negozi di dolciumi o a carnevale. Tende e comprimere prima in questa direzione, poi in quella, poi in un'altra, poi in un'altra e in un'altra ancora. La tensione e la compressione oscillano con il tempo in modo casuale e caotico (così come misurato dall'astronauta in caduta), ma in media diventano sempre più forti e le loro oscillazioni sempre più veloci man mano che l'astronauta si avvicina alla singolarità. Charles Misner (che ha scoperto questo tipo di singolarità caoticamente oscillante indipendentemente da Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz) l'ha chiamata *oscillazione frullatore* (*mixmaster*) perché si può immaginare che mescoli le parti del corpo dell'astronauta come un frullino o una frusta mescolano il tuorlo e l'albume di un uovo. La figura 13.6 mostra un esempio specifico di come le forze di marea possano oscillare, ma la sequenza precisa di oscillazioni è caoticamente imprevedibile.

Nella versione di Misner della singolarità tipo frullatore le oscillazioni erano le stesse ovunque nello spazio, in un dato momento di tempo (così come misurate, ad esempio, dall'astronauta). Non era così per la singolarità BKL. Le sue oscillazioni sono caotiche sia spazialmente che temporalmente, come i movimenti turbolenti della schiuma delle onde dell'oceano quando si infrangono sono caotici sia nel tempo che nello spazio. Ad esempio, mentre la testa dell'astronauta viene alternativamente tesa e compressa («colpita») lungo la direzione nord/sud, il suo piede destro può essere colpito lungo la

13.6 – Un esempio di come le forze di marea possano oscillare nel tempo in una singolarità BKL. Le forze di marea agiscono in modi diversi lungo tre diverse direzioni perpendicolari. Queste direzioni, per chiarezza, qui vengono chiamate AB (per alto/basso), NS (per nord/sud), e EO (per est/ovest), e ognuna delle tre curve descrive il comportamento della forza di marea lungo una di queste direzioni. Il tempo è indicato orizzontalmente. In ogni momento, quando la curva AB è *al di sopra* dell'asse temporale orizzontale, la forza di marea esercita *tensione* lungo la direzione AB, mentre nei momenti in cui la curva AB è al di sotto di tale asse, la forza di marea AB esercita *compressione*. Più la curva è alta sopra l'asse, più forte è la tensione; più bassa è la curva sotto l'asse, più forte è la compressione. Si noti quanto segue: (i) in qualsiasi istante si verifica una compressione lungo due direzioni e una tensione lungo una direzione; (ii) le forze di marea oscillano tra tensione e compressione, ogni oscillazione viene chiamata *ciclo*; i cicli sono raggruppati in «ere». Durante ogni era una delle tre direzioni è sottoposta a una compressione abbastanza costante, mentre le altre due oscillano tra tensione e compressione; (iv) quando l'era cambia, cambia anche la direzione costante; (v) quando ci si avvicina alla singolarità, le oscillazioni diventano infinitamente rapide e le forze di marea infinitamente intense. I particolari relativi alla suddivisione dei cicli in ere e gli schemi di variazione delle oscillazioni all'inizio di ogni era sono governati da quella che a volte viene chiamata una «mappa caotica».

direzione nordest/sudovest, e quello sinistro lungo la direzione sud-sudest/nord-nordovest; e la frequenza delle oscillazioni dei colpi inferti alla testa, al piede destro e a quello sinistro può essere molto diversa.

L'equazione di Einstein prevede che, quando l'astronauta raggiunge la singolarità, le forze di marea acquistino una forza infinita e che le loro oscillazioni caotiche diventino infinitamente rapide. L'astronauta muore e gli atomi di cui è composto il suo corpo vengono infinitamente e caoticamente distorti e mescolati, e a quel punto, nel momento in cui tutto diventa infinito (l'intensità della marea, la frequenza delle oscillazioni, le distorsioni e il mescolamento) lo spaziotempo cessa di esistere.

Le leggi della meccanica quantistica si oppongono a tutto ciò. Esse proibiscono gli infiniti. Molto vicino alla singolarità, per quanto ne sappiamo nel 1993, le leggi della meccanica quantistica si fondono con le leggi della relatività generale di Einstein e cambiano completamente le «regole del gioco». Le nuove regole vengono chiamate gravità quantistica.

L'astronauta è già morto, le parti del suo corpo sono già completamente mescolate tra loro e gli atomi di cui era fatto sono già distorti in modo irriconoscibile quando la gravità quantistica prende il sopravvento. Ma niente è infinito. Il «gioco» continua.

Ma quand'è che si impone la gravità quantistica, e che cosa fa? Per quello che ne sappiamo ora (e ne sappiamo abbastanza poco), la gravità quantistica prende il sopravvento quando la marea gravitazionale (curvatura dello spaziotempo) che oscilla diventa così ampia da deformare tutti gli oggetti in circa 10^{-43} secondi o meno[2]. La gravità quantistica cambia poi radicalmente il carattere dello spaziotempo. Scioglie lo spazio e il tempo l'uno dall'altro e poi distrugge il tempo in quanto concetto e la definitezza dello spazio. Il tempo cessa di esistere; non possiamo più dire che «una cosa succede prima di un'altra», perché senza tempo non vi è il concetto di «prima» o di «dopo». Lo spazio, la sola cosa che resta di ciò che una volta era uno spaziotempo unificato, diventa una schiuma aleatoria, probabilistica, come quella di un sapone.

Prima della sua rottura (ossia al di fuori della singolarità) lo spaziotempo è come un pezzo di legno impregnato d'acqua. In quest'analogia il legno rappresenta lo spazio, l'acqua rappresenta il tempo e i due (il legno e l'acqua, lo spazio e il tempo) sono strettamente interconnessi, unificati. La singolarità e le leggi della gravità quantistica che la governano sono come un fuoco in cui venga gettato il legno imbevuto d'acqua. Il fuoco fa evaporare l'acqua dal legno, lasciandolo solo e vulnerabile; nella singolarità le leggi della gravità quan-

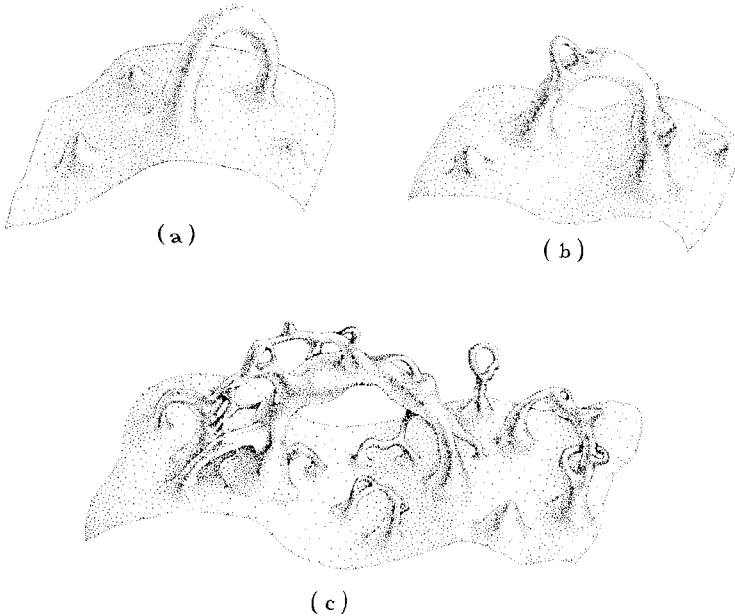
tistica distruggono il tempo, lasciando lo spazio solo e vulnerabile. Il fuoco poi trasforma il legno in una schiuma di schegge e cenere; le leggi della gravità quantistica poi trasformano lo spazio in una schiuma aleatoria, probabilistica.

Questa schiuma aleatoria, probabilistica, è la cosa di cui è fatta la singolarità, e la schiuma è governata dalle leggi della gravità quantistica. Nella schiuma lo spazio non ha una forma definita (ossia, nessuna curvatura definita, o addirittura nessuna topologia determinata). Ha piuttosto varie probabilità per questa, quella o un'altra curvatura e topologia. Ad esempio, dentro la singolarità potrebbe esservi una probabilità dello 0,1% che la curvatura e la topologia dello spazio abbiano la forma indicata nella figura 13.7b, e lo 0,02% che abbiano la forma della figura 13.7c, e così via. Questo *non* significa che lo spazio passi lo 0,1% del suo *tempo* nella forma (a), lo 0,4% del suo *tempo* nella forma (b) e lo 0,02% del suo *tempo* nella forma (c), perché *non esiste una cosa come il tempo all'interno della singolarità.* E analogamente, poiché non vi è il tempo, è totalmente privo di significato chiedersi se lo spazio assuma la forma (b) «prima» o «dopo» della forma (c). La sola domanda significativa che ci si può porre sulla singolarità è: «Quali probabilità ci sono che lo spazio di cui è fatta assuma la forma (a), (b) o (c)?». E le risposte saranno semplicemente 0,1%, 0,4% e 0,02%.

Poiché tutte le curvature e le tipologie concepibili sono permesse all'interno della singolarità, per assurde che siano, si dice che la singolarità è fatta di una schiuma probabilistica. John Wheeler, che per primo ha sostenuto che questa deve essere la natura dello spazio quando dominano le leggi della gravità quantistica, l'ha chiamata *schiuma quantistica.*

Per ricapitolare, al centro del buco nero, nella regione dello spaziotempo in cui le forze di marea oscillanti della BKL raggiungono il loro massimo, si trova una singolarità; una regione in cui il tempo non esiste più e lo spazio ha lasciato il campo a una schiuma quantistica.

Uno dei compiti delle leggi della gravità quantistica è quello di governare le probabilità delle varie curvature e topologie all'interno della singolarità di un buco nero. Un altro, presumibilmente, è determinare le probabilità che la singolarità dia vita a «nuovi universi», ossia a nuove regioni classiche (non quantistiche) dello spaziotempo nello stesso senso in cui la singolarità del Big Bang ha dato vita al nostro Universo circa 15 miliardi di anni fa.

Quanto è probabile che una singolarità dia vita a «nuovi universi»? Non lo sappiamo. Potrebbe non accadere mai, o potrebbe essere abbastanza comune, oppure potremmo essere completamente fuori strada a pensare che le singolarità siano fatte di schiuma quantistica.

13.7 – Diagrammi a incasso che raffigurano la schiuma quantistica che si ritiene risieda nella singolarità all'interno di un buco nero. La geometria e la topologia dello spazio non sono definite, sono probabilistiche. Esse potrebbero ad esempio avere una probabilità dello 0,1% di assumere la forma indicata in (a), dello 0,4% quella indicata in (b) e dello 0,02% quella indicata in (c) e così via.

Risposte chiare potrebbero arrivare in un decennio o due dalle ricerche che stano effettuando Stephen Hawking, James Hartle e altri, sviluppando le basi poste da John Wheeler e Bryce DeWitt[3].

Quasi tutto nell'Universo cambia con l'età: le stelle consumano il loro combustibile e muoiono; la Terra perde gradualmente la sua atmosfera per evaporazione nello spazio, e alla fine resterà un pianeta morto e senza aria; e noi esseri umani invecchiamo e diventiamo più saggi.

Le forze di marea nelle profondità di un buco nero, vicino alla singolarità, non fanno eccezione. Anche esse devono cambiare con l'età, secondo i calcoli effettuati nel 1991 da Werner Israel ed Eric Poisson dell'Università di Alberta, e da Amos Ori, un postdoc della mia équipe del Caltech (elaboran-

do precedenti lavori di Andrei Doroshkevich e Igor Novikov). Quando il buco si è appena formato, le sue forze di marea interne presentano violente, caotiche oscillazioni di tipo BKL (figura 13.6). Tuttavia, quando il buco invecchia, le oscillazioni caotiche diventano più miti e leggere, e gradualmente scompaiono.

Ad esempio, un astronauta che precipiti in un buco nero dalla massa pari a 10 miliardi di volte quella del Sole, al centro di un quasar nelle prime ore dopo la sua nascita, verrà fatto a pezzi da forze di marea BKL che oscillano violentemente. Ma un secondo astronauta che attenda un giorno o due dopo la nascita del buco prima di tuffarsi al suo interno troverà delle forze di marea che oscillano in modo molto più leggero. La tensione e la compressione gravitazionali sono ancora abbastanza ampie da uccidere il secondo astronauta, ma essendo più miti del giorno precedente, la tensione e la compressione oscillanti consentiranno all'astronauta di vivere più a lungo e, prima di morire, di avvicinarsi alla singolarità più del primo astronauta. Un terzo astronauta che aspetti che il buco abbia molti anni prima di tuffarsi al suo interno, incontrerà un destino ancora più clemente. Le forze di marea che circondano la singolarità ora sono divenute così miti e deboli, secondo i calcoli di Israel, Poisson e Ori, che l'astronauta le percepirà a stento. Sopravvivrà quasi illeso, proprio sul margine della singolarità caratterizzata dalla gravità quantistica probabilistica. Solo sul margine della singolarità, quando si troverà faccia a faccia con le leggi della gravità quantistica, l'astronauta verrà ucciso, e noi non possiamo nemmeno essere assolutamente certi che venga ucciso, dato che non comprendiamo affatto bene le leggi della gravità quantistica e le loro conseguenze.

L'invecchiamento delle forze di marea all'interno di un buco nero non è inesorabile. Ogni volta che della materia, delle radiazioni (o degli astronauti) cadono nel buco, alimentano e irrobustiscono le forze di marea, come un pezzo di carne tirato a un leone. La tensione e la compressione oscillatorie nei pressi della singolarità, una volta alimentate, aumentano di intensità per breve tempo, poi scemano e tornano in stato di quiete.

Alla fine degli anni Cinquanta e nei primi anni Sessanta John Wheeler aveva un sogno, una speranza: che gli esseri umani potessero un giorno essere in grado di esplorare una singolarità e osservare la gravità quantistica all'opera, che potessero esplorarla non solo con la matematica e le simulazioni al computer, ma anche con osservazioni fisiche ed esperimenti reali. Oppenheimer e Snyder cancellarono quella speranza (capitolo VI). Come essi sco-

prirono, l'orizzonte che si forma intorno a una stella che implode nasconde la singolarità alla vista esterna. Se restiamo per sempre al di fuori dell'orizzonte non c'è modo di esplorare le singolarità. E se ci tuffiamo attraverso l'orizzonte di un enorme buco nero e sopravviviamo fino a trovarci faccia a faccia con la singolarità e la sua gravità quantistica, non ci sarà modo di comunicare una descrizione del nostro incontro alla Terra. La nostra trasmissione non può uscire dal buco, l'orizzonte la nasconde.

Sebbene Wheeler abbia rinunciato da tempo al suo sogno e ora sia divenuto l'alfiere della visione secondo cui è impossibile avventurarsi in una singolarità, non è del tutto sicuro che egli abbia ragione. È concepibile che l'implosione di qualche stella estremamente non sferica produca delle singolarità nude, ossia singolarità non circondate da orizzonti e che quindi possono essere osservate ed esplorate dall'Universo esterno, addirittura dalla Terra.

Alla fine degli anni Sessanta Roger Penrose cercò a fondo, con la matematica, un esempio di un'implosione che crei una singolarità nuda. La sua ricerca non diede frutti. Ogni volta che, nelle sue equazioni, un'implosione dava luogo a una singolarità, vi formava anche un orizzonte intorno. Penrose non era sorpreso. Dopotutto, se si dovesse formare una singolarità nuda, sarebbe ragionevole aspettarsi che, appena prima che la singolarità si formi, della luce possa sfuggire dalle sue vicinanze; e se la luce può fuoriuscire, allora (sembrerebbe) può farlo anche la materia che implode e forma la singolarità; e se il materiale che implode può fuoriuscire, allora presumibilmente la sua enorme pressione interna lo farà fuoriuscire, invertendo l'implosione e, come prima cosa, impedendo alla singolarità di formarsi. Così sembrava. Tuttavia, né le elaborazioni matematiche di Penrose né nessun altro era in grado di dire con certezza che fosse così.

Nel 1969 Penrose, profondamente convinto del fatto che le singolarità nude non potessero esistere, ma incapace di dimostrarlo, propose una congettura, *la congettura della censura cosmica: nessun oggetto che imploda può mai formare una singolarità nuda; se una singolarità si forma, deve essere rivestita da un orizzonte di modo che noi nell'Universo esterno non possiamo vederla.*

I membri dell'«establishment» della fisica, fisici come John Wheeler, il cui punto di vista era tra i più influenti, abbracciarono la censura cosmica e la sposarono come se fosse quasi certamente corretta. Ciononostante, quasi un quarto di secolo dopo che Penrose la propose, la censura cosmica deve ancora essere dimostrata, e recenti simulazioni al computer dell'implosione di stelle estremamente non sferiche suggeriscono che *potrebbe* addirittura essere sbagliata. Alcune implosioni, secondo queste simulazioni, effettuate

da Stuart Shapiro e Saul Teukolsky della Cornell University, potrebbero in effetti dare luogo a delle singolarità nude. Potrebbero, non «possono», semplicemente potrebbero.

Stephen Hawking è oggi il massimo rappresentante dell'establishment e John Preskill (un mio collega del Caltech) e io ci divertiamo a stuzzicare l'establishment. Perciò nel 1991 io e Preskill abbiamo fatto una scommessa con Hawking (figura 13.8). Abbiamo scommesso che la censura cosmica è sbagliata; le singolarità nude possono formarsi nel nostro Universo. Hawking ha scommesso che la censura cosmica è giusta; le singolarità nude non possono formarsi mai.

Appena quattro mesi dopo aver fatto la scommessa, lo stesso Hawking scoprì una prova matematica (ma *non una prova incontrovertibile*) del fatto che, quando un buco nero ha completato la sua evaporazione (capitolo XII) potrebbe non scomparire del tutto come egli si aspettava in precedenza ma lasciarsi dietro una piccola singolarità nuda. Hawking annunciò questo risultato a Preskill e a me privatamente qualche giorno dopo averlo scoperto in una cena a casa di Preskill. Ma quando io e Preskill lo invitammo a pagare la

13.8 – Scommessa tra Stephen Hawking, John Preskill e me sulla correttezza della congettura della censura cosmica di Penrose.

Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds stirling to 50 pounds stirling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.

Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

scommessa rifiutò adducendo come motivo alcuni aspetti tecnici. La formulazione della nostra scommessa era molto chiara, affermò: la scommessa riguardava soltanto le singolarità nude la cui formazione è governata dalle leggi della fisica classica (non dalla meccanica quantistica), comprese le leggi della relatività generale. Tuttavia, l'evaporazione dei buchi neri è un fenomeno della meccanica quantistica e non è governato dalle leggi della relatività generale, ma dalla teoria dei campi nello spaziotempo curvo, quindi qualsiasi singolarità nuda che derivi dall'evaporazione di un buco nero non rientrava nell'ambito della nostra scommessa, affermò Hawking (correttamente). Ciononostante, una singolarità nuda, comunque si formi, sarebbe un duro colpo per l'establishment!

Anche se ci divertiamo con le nostre scommesse, le questioni che dibattiamo sono profondamente serie. Se le singolarità nude possono esistere, solo le mal comprese leggi della gravità quantistica possono dirci come si comportano, che effetti possono avere sullo spaziotempo nelle loro vicinanze, e se le loro azioni possono avere effetti di vasta portata o solo limitati nell'Universo in cui abitiamo. Poiché le singolarità nude, se possono esistere, avrebbero una notevole influenza sul nostro Universo, desideriamo ardentemente scoprire se la censura cosmica è corretta e cosa prevedono le leggi della gravità quantistica riguardo al comportamento delle singolarità. La lotta per scoprirlo non sarà facile né di breve durata.

XIV. CUNICOLI TEMPORALI E MACCHINE DEL TEMPO*

Dove l'autore cerca di scoprire qualcosa sulle leggi fisiche domandandosi: delle civiltà molto avanzate potrebbero costruire dei cunicoli temporali nell'iperspazio per effettuare rapidi viaggi interstellari e macchine per viaggiare indietro nel tempo?

Cunicoli temporali e materiale esotico

Avevo appena tenuto la mia ultima lezione dell'anno accademico 1984-85 e mi ero accasciato sulla poltrona del mio ufficio per smaltire l'adrenalina, quando squillò il telefono. Era Carl Sagan, astrofisico della Cornell University e amico di vecchia data. «Spiacente di disturbarti, Kip», disse. «Ma sto appena finendo un romanzo sul primo contatto della razza umana con una civiltà extraterrestre e sono preoccupato. Vorrei che gli aspetti scientifici fossero il più possibile esatti, e ho paura di aver commesso qualche errore sulla fisica gravitazionale. Vuoi dargli uno sguardo e darmi qualche consiglio?». Ma certo. Poteva essere interessante, Carl era un tipo sveglio. E poteva anche essere divertente. E poi come si fa a dire di no a un amico?

Il romanzo arrivò un paio di settimane dopo, un blocco alto dieci centimetri di fogli scritti a interlinea due.

Infilai il dattiloscritto in una borsa e la tirai sul sedile posteriore della Bronco di Linda quando venne a prendermi per il lungo tragitto da Pasadena a Santa Cruz. Linda è la mia ex-moglie; lei, io e nostro figlio Bret andavamo ad assistere alla laurea di nostra figlia Kares.

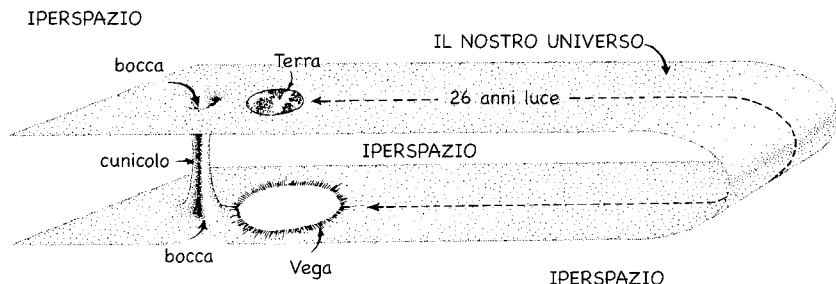
Mentre Linda e Bet si alternavano alla guida io leggevo e pensavo (Linda e

* Ho deciso di scrivere questo capitolo unicamente dal mio punto di vista personale. Perciò è molto meno obiettivo del resto del libro e illustra la ricerca di altre persone meno adeguatamente e completamente della mia.

Bret erano abituati a questa introversione, avevano vissuto con me per molti anni). Il romanzo era divertente, ma Carl in effetti era nei pasticci. La sua eroina, Eleanor Arroway, si tuffava in un buco nero vicino alla Terra, viaggiava nell'iperspazio nel modo indicato nella figura 13.4 e riemergeva un'ora dopo in prossimità di Vega, a ventisei anni luce di distanza. Carl, non essendo un esperto di relatività, non aveva familiarità con i metodi perturbativi[1]: *è impossibile viaggiare nell'iperspazio dal centro di un buco nero verso un'altra parte del nostro Universo.* Qualsiasi buco nero viene bombardato in continuazione da piccole fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto e da piccole quantità di radiazioni. Quando queste fluttuazioni e radiazioni cadono nel buco vengono accelerate dalla gravità del buco e acquisiscono un'enorme energia, e quindi piovono esplosivamente su qualsiasi «piccolo universo chiuso», «tunnel» o altro veicolo con il quale si potrebbe cercare di intraprendere il viaggio attraverso l'iperspazio. I calcoli erano inequivocabili; qualsiasi veicolo per il viaggio nell'iperspazio viene distrutto dalla «pioggia» esplosiva prima che il viaggio possa iniziare. Il romanzo di Carl andava modificato.

Al ritorno da Santa Cruz, da qualche parte a ovest di Fresno sull'Interstatale 5, mi venne il barlume di un'idea. Forse Carl poteva sostituire il suo buco nero con un *cunicolo* attraverso l'iperspazio.

Un cunicolo è un'ipotetica scorciatoia per viaggiare tra due punti distanti dell'Universo. Il cunicolo ha due entrate chiamate «bocche», una (ad esempio) vicino alla Terra e l'altra (ad esempio) in orbita attorno a Vega, a ventisei anni luce di distanza. Le bocche sono collegate l'una all'altra da un tunnel attraverso l'iperspazio (il cunicolo) che può essere lungo solo un chilometro. Se entriamo nella bocca vicina alla Terra ci ritroviamo nel tunnel. Viaggiamo per appena un chilometro lungo il tunnel, raggiungiamo l'altra bocca e usciamo vicino a Vega, a ventisei anni luce di distanza, secondo le misurazioni effettuate nell'Universo esterno.

La figura 14.1 rappresenta un simile cunicolo in un diagramma a incasso. Esso, come avviene di solito per i diagrammi a incasso, semplifica il nostro Universo come se avesse solo due dimensioni spaziali invece di tre (si vedano le figure 3.2 e 3.3). Nel diagramma lo spazio del nostro Universo è raffigurato come un foglio bidimensionale. Come una formica che cammina su un foglio non bada al fatto che il foglio sia piatto o piegato per bene, noi nel nostro Universo non badiamo al fatto che esso sia piatto nell'iperspazio o sia piegato per bene come nel diagramma. Ma quella piegatura è importante; essa consente alla Terra e a Vega di essere vicini l'uno all'altra nell'iperspazio,

14.1 – Un cunicolo temporale lungo un chilometro attraverso l'iperspazio che collega la Terra alle vicinanze di Vega, a 26 anni luce di distanza (disegno non in scala).

di modo che possano essere collegati dal breve cunicolo temporale. Con il cunicolo temporale in funzione, come una formica o un verme che percorrano la superficie del diagramma a incasso, abbiamo due possibili tragitti dalla Terra a Vega: il percorso lungo ventisei anni luce attraverso l'Universo esterno e quello breve di un chilometro attraverso il cunicolo.

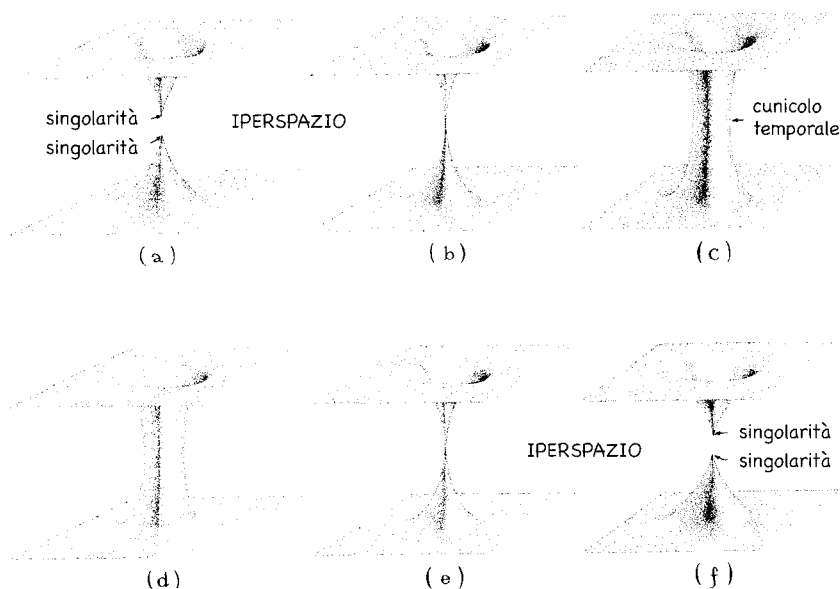
Come sarebbe la bocca del cunicolo temporale se fosse sulla Terra davanti a noi? Nell'universo bidimensionale del diagramma la bocca è raffigurata come un cerchio; pertanto, nel nostro Universo tridimensionale sarebbe l'analogo tridimensionale di un cerchio, cioè una sfera. In realtà, la bocca apparirebbe come l'orizzonte sferico di un buco nero non rotante, con un'eccezione fondamentale: l'orizzonte è una superficie «a senso unico», tutto può entrarvi, ma niente può uscirne. Invece, la bocca del cunicolo temporale è una superficie «a doppio senso di marcia»; possiamo attraversarla in entrambe le direzioni verso l'interno, dentro il cunicolo, oppure verso l'Universo esterno. Se guardiamo nella bocca sferica possiamo vedere la luce proveniente da Vega; la luce è entrata nell'altra bocca vicina a Vega e ha viaggiato attraverso il cunicolo temporale, come se esso fosse un tubo luminoso o una fibra ottica fino alla bocca vicina alla Terra, da dove ora fuoriesce e ci colpisce gli occhi.

I cunicoli temporali non sono il frutto dell'immaginazione di uno scrittore di fantascienza. Essi sono stati scoperti matematicamente da Ludwig Flamm in quanto soluzione all'equazione di campo di Einstein nel 1916, appena pochi mesi dopo che Einstein l'aveva formulata; Einstein e Nathan Rosen li esplora-

rono negli anni Trenta, e John Wheeler e la sua équipe di ricerca li studiarono ampiamente con una varietà di calcoli matematici negli anni Cinquanta. Tuttavia, nessuno dei cunicoli temporali che erano stati trovati come soluzioni dell'equazione di Einstein, prima del viaggio lungo l'Interstatale 5, era adatto al romanzo di Carl Sagan, perché nessuno di essi poteva essere attraversato senza pericoli. Era previsto che ognuno di essi evolvesse nel tempo in modo assai particolare: il cunicolo viene creato in un determinato istante di tempo, si apre brevemente e poi si dissolve e scompare, e la sua durata complessiva da quando viene creato a quando scompare è talmente breve che nulla (né una persona, né una radiazione, né un segnale di qualsiasi tipo) può viaggiare attraverso di esso da una bocca all'altra. Qualunque cosa ci provi verrà catturata e distrutta nel suo dissolvimento. La figura 14.2 mostra un semplice esempio di ciò.

Come la maggior parte dei fisici miei colleghi, sono stato scettico per decenni sui cunicoli temporali. Non solo l'equazione di campo di Einstein prevede che abbiano vita breve se lasciati a se stessi, ma la loro esistenza è resa ancora più breve dalla caduta aleatoria di piccole quantità di radiazioni: la radiazione (secondo i calcoli di Doug Eardley e Ian Redmount) viene accelerata fino ad acquistare un'energia ultraelevata dalla gravità del cunicolo, e in quanto radiazione carica di energia bombarda la gola del cunicolo temporale, la spinge a contrarsi e ad assottigliarsi più rapidamente che non altrimenti, così velocemente, in effetti, che il cunicolo ha a malapena un'esistenza.

C'è un'altra ragione di scetticismo. Mentre i *buchi neri* sono una conseguenza inevitabile dell'evoluzione stellare (le stelle massive che ruotano lentamente, del tipo che gli astronomi vedono a profusione nella nostra galassia, quando muoiono implodono e formano dei buchi neri), non vi è un modo analogo, naturale, che porti alla creazione di un cunicolo temporale. In realtà, non vi è alcuna ragione di pensare che il nostro Universo contenga oggi *qualsiasi* singolarità del tipo che dà luogo ai cunicoli temporali (figura 14.2); e anche se queste singolarità esistessero, è difficile comprendere come due di esse possano trovarsi negli enormi meandri dell'iperspazio in modo da creare un cunicolo temporale nel modo indicato dalla figura 14.2.

Quando un amico chiede aiuto si è pronti a rivolgersi ovunque lo si possa trovare. I cunicoli temporali, malgrado il mio scetticismo, sembravano l'unico aiuto in vista. Forse, mi venne in mente sull'Interstatale 5 da qualche parte a ovest di Fresno, c'è un modo in cui una civiltà infinitamente avanzata possa tenere aperto un cunicolo temporale, ossia impedirgli di scomparire, in modo che Eleanore Arroway possa viaggiare attraverso di esso dalla Terra a Vega e

14.2 – L'evoluzione di un cunicolo temporale perfettamente sferico che non contiene materiale al suo interno (quest'evoluzione è stata scoperta come soluzione dell'equazione di campo di Einstein a metà degli Cinquanta da Martin Kruskal, un giovane associato di Wheeler all'Università di Princeton). Inizialmente (a) non c'è un cunicolo, ma una singolarità vicino alla Terra e una vicino a Vega. Poi, in qualche istante del tempo (b) le due singolarità si estendono attraverso l'iperspazio, si trovano, si annichiliscono a vicenda e nell'annichilimento creano il cunicolo temporale. Quest'ultimo aumenta di circonferenza (c), poi comincia a contrarsi di nuovo (d) e si assottiglia (e) creando due singolarità (f) simili a quelle in cui è nato il cunicolo, ma con un'eccezione cruciale. Ogni singolarità iniziale (a) è come quella del Big Bang; il tempo scorre al di fuori di essa, di modo che possa dare vita a qualcosa: l'Universo nel caso del Big Bang, e il cunicolo temporale in questo caso. Ogni singolarità finale (f), invece, è come quella del «big crunch» (capitolo XIII); il tempo scorre al suo interno, di modo che le cose vi vengono distrutte: l'Universo, nel caso del «big crunch». Qualsiasi cosa che cerchi di attraversare il cunicolo durante la sua breve vita viene catturata nell'assottigliamento e, assieme al cunicolo stesso, viene distrutta nella singolarità finale.

ritorno. Presi carta e penna e cominciai a calcolare (fortunatamente l'Interstatale 5 è molto rettilinea e ho potuto fare i miei calcoli senza che mi venisse il mal d'auto).

Per facilitare i calcoli semplificai il cunicolo rendendolo perfettamente sferico (quindi nella figura 14.1, in cui una delle tre dimensioni del nostro Universo è stata soppressa, ha una sezione esattamente circolare). Poi, grazie a due pagine di calcoli basati sull'equazione di campo di Einstein, scoprii tre cose.

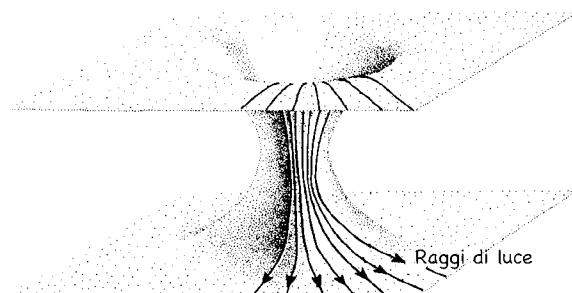
Primo, il solo modo per tenere il cunicolo aperto è infilarvi dentro qualche tipo di materiale che ne separi le pareti, gravitazionalmente. Chiamerò questo materiale *esotico* perché, come vedremo, è alquanto diverso da qualsiasi altro materiale mai visto da un essere umano.

Secondo, scoprii che come il materiale necessario deve tenere separate le pareti del cunicolo, quando un fascio luminoso passa attraverso il materiale, quest'ultimo premerà gravitazionalmente sui raggi di luce separandoli l'uno dall'altro. In altre parole, il materiale esotico si comporterà come una «lente defocalizzante»; esso defocalizzerà gravitazionalmente il fascio luminoso (si veda la scheda 14.1).

Terzo, appresi dall'equazione di campo di Einstein che per defocalizzare gravitazionalmente i fasci di luce e tenere gravitazionalmente separate le pareti del cunicolo *il materiale esotico immesso nel cunicolo deve avere una densità media di energia negativa, dal punto di vista di un fascio di luce che lo attraversi*. Ciò richiede qualche spiegazione. Si ricordi che la gravità (curvatura dello spaziotempo) è prodotta dalla massa (scheda 2.6) e che la massa e l'energia sono equivalenti (scheda 5.2 dove l'equivalenza è esemplificata dalla famosa equazione di Einstein $E = Mc^2$). Ciò significa che la gravità può essere pensata come un prodotto dell'energia. Prendiamo ora la densità di energia del materiale all'interno del cunicolo temporale (la sua energia per centimetro cubo) così come misurata da un fascio di luce, ossia misurata da qualcuno che viaggia attraverso il cunicolo (quasi) alla velocità della luce, e calcoliamo la media della densità dell'energia lungo la traiettoria del fascio di luce. La densità di energia che ne risulta deve essere in media negativa affinché il materiale sia in grado di defocalizzare il fascio di luce e tenere il cunicolo aperto, ossia affinché il materiale del cunicolo sia «esotico»[2].

Ciò non significa necessariamente che il materiale esotico abbia energia negativa se misurata da qualcuno che si trovi in stato di quiete all'interno del cunicolo. La densità dell'energia è un concetto relativo, non assoluto; in un quadro di riferimento può essere negativa, e in un altro positiva. Il materiale

Scheda 14.1
TENERE APERTO UN CUNICOLO TEMPORALE: IL MATERIALE ESOTICO

Qualsiasi cunicolo temporale sferico attraverso cui possa viaggiare un fascio di luce defocalizzerà gravitazionalmente il fascio di luce. Per accorgersi del fatto che sia così, immaginiamo (come qui di seguito illustrato) che il fascio venga fatto passare attraverso una lente convergente prima di entrare nel cunicolo, facendo in tal modo convergere tutti i suoi raggi radialmente verso il centro del cunicolo. I raggi, poi, continueranno a viaggiare sempre radialmente (in che altro modo potrebbero mai muoversi?), il che significa che quando escono dall'altra bocca divergono radialmente verso l'esterno, allontanandosi dal centro del cunicolo, come indicato. Il fascio è stato defocalizzato.

La curvatura dello spaziotempo del cunicolo temporale, che provoca la defocalizzazione, è prodotta dal materiale «esotico» che penetra nel cunicolo e lo mantiene aperto. Dato che la curvatura dello spaziotempo è equivalente alla gravità, è in effetti la gravità del materiale esotico a defocalizzare il fascio luminoso. In altre parole, il materiale esotico respinge gravitazionalmente i raggi di luce del fascio allontanandoli da sé e quindi l'uno dall'altro, defocalizzandoli.
Ciò è esattamente l'opposto di quanto accade in una lente gravitazionale (figura 8.2). Lì la luce proveniente da una stella distante viene focalizzata dall'attrazione gravitazionale di una stella, di una galassia o di un buco nero di passaggio; qui la luce viene defocalizzata.

esotico può avere una densità di energia negativa se misurata nel quadro di riferimento di un raggio di luce che lo attraversa, ma una densità positiva se misurata nel quadro di riferimento del cunicolo temporale. Ciononostante, poiché quasi tutte le forme di materia che noi esseri umani abbiamo mai incontrato hanno densità di energia in media positive nel quadro di riferimento di *chiunque*, i fisici hanno a lungo sospettato che il materiale esotico non possa esistere. Presumibilmente, le leggi della fisica proibiscono l'esistenza del materiale esotico, abbiamo ipotizzato noi fisici, ma *in che modo* lo facciano non era affatto chiaro.

Forse il nostro pregiudizio verso l'esistenza del materiale esotico è errato, pensai tra me mentre viaggiavo lungo l'Interstatale 5. Forse il materiale esotico *può* esistere. Era l'unico modo che vedevo per aiutare Carl. Quindi, una volta arrivato a Pasadena, gli scrissi una lunga lettera in cui gli spiegavo che la sua eroina non poteva usare i buchi neri per compiere viaggi interstellari a gran velocità, e gli suggerivo di farle usare invece i cunicoli temporali e di far scoprire a qualcuno nel romanzo che il materiale esotico può esistere davvero e può essere usato per tenerli aperti. Carl accettò i miei suggerimenti con piacere e li inserì nella versione finale del suo romanzo, *Contatto cosmico*[3].

Mi venne in mente, dopo aver inviato i miei suggerimenti a Carl Sagan, che il suo romanzo avrebbe potuto essere utilizzato come strumento pedagogico per gli studenti che affrontavano la relatività generale. Come supporto per loro, nell'autunno del 1985, Mike Morris (uno dei miei studenti) e io cominciammo a scrivere un articolo sulle equazioni relativistiche generali per i cunicoli temporali sostenuti da materiale esotico e sulla connessione tra tali equazioni e il romanzo di Sagan.

Procedevamo lentamente. C'erano altri progetti più urgenti e prioritari. Nell'inverno 1987-88 avevamo spedito il nostro articolo all'«American Journal of Physics», ma non era ancora stato pubblicato e Morris, avvicinandosi al termine della preparazione per il Ph.D. stava sollecitando un posto da postdoc. Morris allegò alle sue domande il manoscritto del nostro articolo. Don Page (professore della Pennsylvania State University ed ex-allievo mio e di Hawking) ricevette la domanda, lesse il manoscritto e scrisse una lettera a Morris.

«Caro Mike… discende immediatamente dalla proposizione 9.2.8 del libro di Hawking e Ellis, oltre che dalle equazioni di campo di Einstein, che *qualsiasi* cunicolo temporale [richiede del materiale esotico per restare aperto]… Cordiali saluti, Don J. Page».

Quanto mi sentii stupido. Non avevo mai studiato i metodi globali[4] (il tema del libro di Hawking e Ellis) approfonditamente e ora ne pagavo lo scotto. Sull'Interstatale 5 avevo dedotto, con poco sforzo, che per tenere aperto un cunicolo temporale sferico bisogna immettervi del materiale esotico. Tuttavia, ora, usando i metodi globali e con uno sforzo ancora minore, Page aveva dedotto che per tenere aperto *qualsiasi* cunicolo temporale (sferico, cubico, o con deformazioni casuali) bisognava immettervi del materiale esotico. Appresi in seguito che Dennis Grannon e C.W. Lewis erano giunti quasi alla stessa conclusione nel 1975.

Questa scoperta, che tutti i cunicoli temporali richiedono del materiale esotico per restare aperti, mise in moto molte ricerche teoriche tra il 1988 e il 1992. «Le leggi della fisica consentono l'esistenza di materiale esotico, e se sì, in quali circostanze?». Questo era l'aspetto centrale.

Una chiave di risposta era stata già fornita negli anni Settanta da Stephen Hawking. Nel 1970, quando stava dimostrando che l'area della superficie dei buchi neri deve aumentare sempre (capitolo XII), Hawking partì dal presupposto che non vi fosse *alcun* materiale esotico vicino all'orizzonte di un buco nero. Qualora ve ne fosse stato, la prova di Hawking sarebbe venuta a cadere, il suo teorema non sarebbe stato valido e l'area della superficie dell'orizzonte avrebbe potuto subire una contrazione. Hawking tuttavia non si preoccupava molto di questa possibilità; nel 1970 sembrava abbastanza certo che il materiale esotico non potesse esistere.

Poi, nel 1974, arrivò una grande sorpresa: Hawking dedusse come sottoprodotto della sua scoperta dell'evaporazione dei buchi neri (capitolo XII) che *le fluttuazioni del vuoto in prossimità di un buco nero sono esotiche*: hanno una densità di energia in media negativa dal punto di vista dei fasci di luce che fuoriescono in prossimità dell'orizzonte del buco. In effetti, è questa proprietà esotica delle fluttuazioni del vuoto che consente all'orizzonte del buco di contrarsi quando il buco evapora, in violazione del teorema dell'aumento dell'area di Hawking. Dato che il materiale esotico riveste grande importanza per la fisica, lo illustrerò in modo più particolareggiato.

Si ricordino l'origine e la natura delle fluttuazioni del vuoto illustrate nella scheda 12.4: quando si cerca di eliminare tutti i campi elettrici e magnetici da qualche regione dello spazio, ossia, quando si cerca di creare un vuoto perfetto, rimane sempre una gran quantità di oscillazioni elettromagnetiche aleatorie, imprevedibili, causate dal braccio di ferro tra i campi in regioni adiacenti dello spazio. I campi «qui» prendono energia in prestito dai campi «lì»,

lasciando questi ultimi con un deficit di energia, ossia, lasciandoli momentaneamente con energia negativa. Quindi i campi in tale regione recuperano rapidamente l'energia più un piccolo quantitativo in eccesso che rende la loro energia momentaneamente positiva, e così via, avanti e indietro.

In condizioni normali sulla Terra, l'energia media di queste fluttuazioni del vuoto è zero. Esse passano uguali intervalli di tempo con deficit e con surplus di energia, e la media si annulla. Non avviene così vicino all'orizzonte di un buco nero che sta evaporando, suggerivano i calcoli di Hawking del 1974. Vicino a un orizzonte, l'energia media deve essere negativa, almeno se misurata da fasci di luce, il che significa che le fluttuazioni del vuoto sono esotiche.

Come ciò avvenga non è stato dedotto nei particolari fino all'inizio degli anni Ottanta, quando Don Page all'Università della Pennsylvania, Philip Candelas a Oxford e molti altri fisici hanno utilizzato la teoria quantistica dei campi nello spaziotempo curvo per esplorare nei dettagli l'influenza dell'orizzonte di un buco nero sulle fluttuazioni del vuoto. Essi scoprirono che l'influenza dell'orizzonte svolge un ruolo centrale. L'orizzonte distorce le fluttuazioni del vuoto allontanandole dalle forme che avrebbero sulla Terra, e attraverso tale distorsione rende negativa la densità media della loro energia, ossia rende le fluttuazioni esotiche.

In quali circostanze le fluttuazioni del vuoto saranno esotiche? Possono essere esotiche dentro un cunicolo temporale e in tal modo tenerlo aperto? Questa era l'ambizione centrale dell'attività di ricerca messa in moto dall'osservazione di Page secondo cui l'unico modo di tenere aperto qualsiasi cunicolo temporale è quello di ricorrere al materiale esotico.

La risposta non è arrivata facilmente e non è del tutto in nostro possesso. Gunnar Klinkhammer (un mio allievo) ha dimostrato che in uno spaziotempo piatto, ossia lontano da tutti gli oggetti gravitanti, le fluttuazioni del vuoto non possono *mai* essere esotiche, non possono mai avere una densità media di energia negativa se misurata da fasci di luce. D'altra parte, Robert Wald (un ex-allievo di Wheeler) e Ulvi Yurtsever (un mio ex-allievo) hanno dimostrato che in uno spaziotempo curvo, in un'ampia varietà di circostanze, la curvatura distorce le fluttuazioni del vuoto rendendole in tal modo esotiche.

Si tratta di un cunicolo temporale che cerca di sfruttare una simile circostanza? Può la curvatura del cunicolo, distorcendole, rendere esotiche le fluttuazioni del vuoto e consentire a esse di tenere aperto il cunicolo? Nel momento in cui questo libro va in stampa non lo sappiamo ancora.

Agli inizi del 1988, quando cominciavano a essere effettuati gli studi teorici sul materiale esotico, iniziai ad accorgermi dell'efficacia del tipo di ricerca che la telefonata di Carl Sagan aveva messo in moto. Come fra tutti gli esperimenti fisici *reali* che uno *sperimentatore* possa realizzare quelli che probabilmente porteranno a una maggiore comprensione delle leggi della fisica sono proprio quelli che mettono più duramente alla prova tali leggi, analogamente, fra tutti gli esperimenti *mentali* che un *teorico* possa studiare quando esplora leggi che sono al di là della portata della tecnologia moderna, quelli che più probabilmente porteranno a nuove profonde conoscenze sono quelli che le mettono più duramente alla prova. E nessun tipo di esperimento mentale sfida più duramente le leggi della fisica di quello avviato da Carl Sagan con la sua telefonata al sottoscritto, esperimenti mentali con i quali ci si chiede: «*Quali cose permettono di fare le leggi della fisica a una civiltà infinitamente avanzata, e quali invece proibiscono?*» (per «infinitamente avanzata» intendo una società le cui attività siano limitate solo dalle leggi della fisica e non dall'incapacità, dalla mancanza di conoscenze o di qualsiasi altra cosa).

Noi fisici, credo, abbiamo avuto la tendenza a evitare queste domande perché sono troppo vicine alla fantascienza. Mentre molti di noi amano leggere fantascienza o addirittura scriverne, temiamo di essere ridicolizzati dai nostri colleghi dedicandoci a ricerche i cui temi sconfinino nella fantascienza. Perciò ci siamo concentrati di preferenza su due altri tipi, meno radicali, di domande: «Che tipo di cose *accadono naturalmente* nell'Universo?» (ad esempio, i buchi neri e i cunicoli temporali si formano naturalmente?). E «quali tipi di cose possiamo fare noi umani con la tecnologia di cui disponiamo attualmente o nel prossimo futuro?» (ad esempio, possiamo produrre nuovi elementi come il plutonio e usarli per realizzare bombe atomiche? E possiamo produrre superconduttori ad alta temperatura e usarli per ridurre i costi energetici dei treni a levitazione e dei magneti per i supercollisori superconduttori?).

Nel 1988 mi sembrava chiaro che noi fisici eravamo stati troppo conservatori con le nostre domande. Una delle *domande alla Sagan* (le chiamerò così) stava già cominciando a dare dei risultati. Chiedendosi se «una civiltà infinitamente avanzata può tenere aperti cunicoli temporali per effettuare velocemente viaggi interstellari?», Morris e io avevamo individuato nel materiale esotico la chiave per tenere aperti i cunicoli temporali e avevamo dato avvio a un tentativo in qualche modo fruttuoso di scoprire le circostanze in cui le leggi della fisica permettono al materiale esotico di esistere o meno.

Supponiamo che il nostro Universo sia stato creato (nel Big Bang) senza nessun cunicolo temporale. Poi, eoni dopo, una volta che la vita intelligente si è evoluta e ha prodotto una (ipotetica) civiltà infinitamente avanzata, *può quest'ultima costruire dei cunicoli temporali per effettuare velocemente viaggi interstellari*? Le leggi della fisica consentono di costruire cunicoli temporali lì dove prima non ne esistevano? Tali leggi permettono questo tipo di cambiamento nella topologia dello spazio del nostro Universo?

Queste domande sono la seconda metà del problema del trasporto interstellare di Carl Sagan. La prima metà, far durare un cunicolo temporale dopo averlo costruito, l'aveva risolta con l'aiuto del materiale esotico. Sulla seconda, ha glissato. Nel suo romanzo egli descrive quello attraverso cui viaggia Eleanor Arroway come un cunicolo temporale attualmente mantenuto in esistenza dal materiale esotico ma costruito in un lontano passato da una civiltà infinitamente avanzata di cui si è persa ogni memoria.

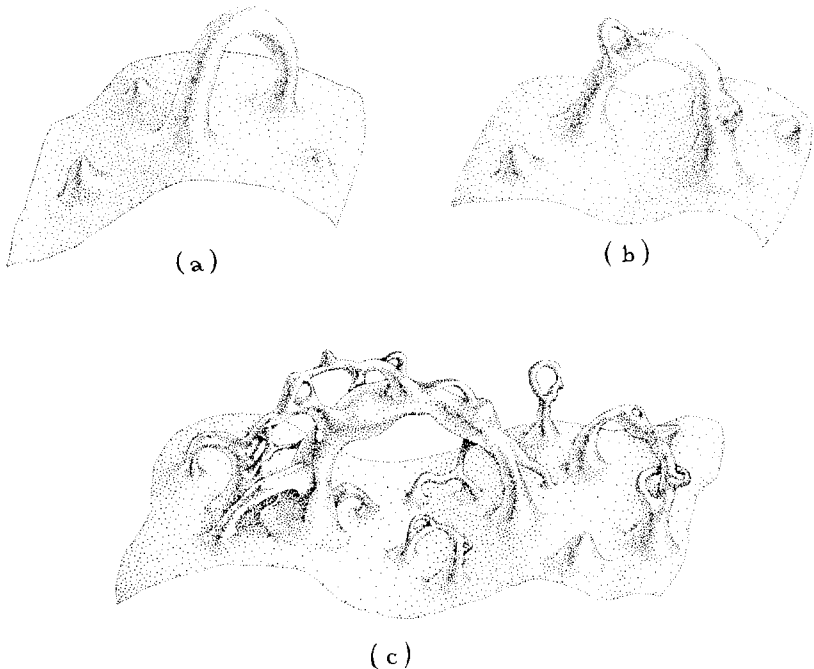
A noi fisici, naturalmente, non piace relegare la creazione dei cunicoli temporali nella preistoria. Vogliamo sapere se e come la topologia dell'Universo può essere modificata *ora*, entro i limiti delle leggi fisiche.

Possiamo immaginare due strategie per costruire un cunicolo temporale dove prima non ce n'erano: una *strategia quantistica* e una *strategia classica*.

La strategia quantistica si basa sulle *fluttuazioni gravitazionali del vuoto* (scheda 12.4), ossia l'equivalente gravitazionale delle fluttuazioni magnetiche del vuoto illustrate in precedenza: fluttuazioni aleatorie, probabilistiche, nella curvatura dello spazio provocate da un braccio di ferro in cui regioni adiacenti dello spazio si sottraggono e restituiscono continuamente energia a vicenda. Si ritiene che le fluttuazioni gravitazionali del vuoto siano presenti ovunque, ma in circostanze ordinarie sono così lievi che nessuno sperimentatore le ha mai rilevate.

Come il moto degenere aleatorio degli elettroni acquista vigore quando essi vengono confinati in regioni dello spazio sempre più piccole (capitolo IV), le fluttuazioni gravitazionali del vuoto sono più energiche nelle regioni piccole che in quelle grandi, ossia quando le lunghezze d'onda sono piccole anziché grandi. Nel 1955 John Wheeler, combinando le leggi della meccanica quantistica con quelle della relatività generale in modo incerto e un po' approssimativo, dedusse che in una regione delle dimensioni della *lunghezza di Planck-Wheeler*[5], $1{,}62 \times 10^{-33}$ centimetri o più piccola, le fluttuazioni del vuoto sono così grandi che lo spazio come noi lo conosciamo «bolle» e diventa un flutto di schiuma quantistica, lo stesso tipo di schiuma quantistica che costituisce il centro di una singolarità spaziotemporale (capitolo XIII, figura 14.3).

La schiuma quantistica, quindi, è dappertutto: dentro i buchi neri, nello spazio interstellare, nella stanza dove siete seduti, nel vostro cervello. Ma per vederla bisogna ingrandirla con un (ipotetico) supermicroscopio, osservando lo spazio e il suo contenuto su scale sempre più piccole. Bisognerebbe ingrandire dalla scala mia e vostra (centinaia di centimetri) alla scala dell'atomo (10^{-8} centimetri), alla scala di un nucleo atomico (10^{-13} centimetri) e scendere ancora di altri *venti* fattori di 10, fino a 10^{-33} centimetri. Alle «grandi» scale iniziali lo spazio sembrerà completamente omogeneo, con una quantità molto definita (ma piccola) di curvatura. Ma quando si procede con l'ingrandimento al microscopio e si arriva a 10^{-32} centimetri, si vedrà lo spazio cominciare a

14.3 – (Identica alla figura 13.7) Diagrammi a incasso raffiguranti la schiuma quantistica. La geometria e la topologia dello spazio non sono definite; sono invece probabilistiche. Esse possono avere, ad esempio, una probabilità dello 0,1% di assumere la forma indicata in (a), dello 0,4% di assumere quella indicata in (b), dello 0,02% quella in (c) e così via.

contorcersi, all'inizio leggermente e poi sempre più energicamente finché, quando una regione di appena 10^{-33} centimetri riempie l'intera lente del supermicroscopio, lo spazio è diventato un flutto di schiuma probabilistica.

Dato che la schiuma quantistica è ovunque, nasce la tentazione di immaginare una civiltà infinitamente avanzata che vi si spinga dentro trovandovi un cunicolo temporale (ad esempio quello «grande» della figura 14.3b con il suo 0,4% di probabilità) e cerchi di afferrarlo e allargare il suo 0,4% fino alle dimensioni classiche. Nello 0,4% di questi tentativi, se la civiltà fosse davvero infinitamente avanzata, potrebbe riuscirci. O ci riuscirebbe?

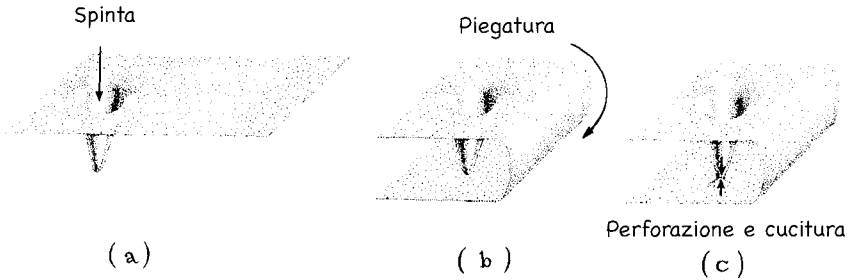
Non comprendiamo ancora abbastanza le leggi della gravità quantistica per saperlo. Una ragione della nostra ignoranza è che non comprendiamo molto bene la stessa schiuma quantistica. Non siamo sicuri al 100% nemmeno della sua esistenza. Tuttavia, la sfida di questo tipo di esperimento mentale alla Sagan – una civiltà infinitamente avanzata che trova dei cunicoli temporali nella schiuma quantistica – potrebbe essere concettualmente di qualche aiuto negli anni a venire per definire meglio la nostra conoscenza della schiuma quantistica e della gravità quantistica.

Fin qui, la *strategia quantistica* di creazione dei cunicoli temporali. Qual è la *strategia classica*?

Nella strategia classica, la nostra civiltà infinitamente avanzata cercherebbe di deformare e ritorcere lo spazio su scale macroscopiche (scale normali, umane) in modo da creare un cunicolo temporale lì dove prima non esisteva. Sembra abbastanza ovvio che, affinché questa strategia abbia successo, *bisogna aprire due buchi nello spazio e cucirli insieme*. La figura 14.4 mostra un esempio del genere.

Una simile perforazione dello spazio produce, momentaneamente, una singolarità nel punto perforato, una singolarità dello spaziotempo, ossia, un confine netto dove lo spaziotempo finisce; e poiché le singolarità sono governate dalle leggi della gravità quantistica, una simile strategia per creare i cunicoli temporali è in realtà meccanico-quantistica, non classica. Non sappiamo se è consentita finché non comprendiamo le leggi della gravità quantistica.

Non c'è via d'uscita? Non c'è modo di creare un cunicolo temporale senza impantanarsi nelle poco conosciute leggi della gravità quantistica, nessuna via *perfettamente classica*?

In modo alquanto sorprendente, *c'è*, ma solo se si è disposti a pagare un prezzo molto elevato. Nel 1966 Robert Geroch (un allievo di Wheeler a Princeton) usò i metodi globali per dimostrare che si può costruire un cunicolo temporale a partire da una deformazione e contorsione omogenea dello spa-

14.4 – Una strategia per costruire un cunicolo temporale. (a) Nella curvatura dello spazio viene creata una «calza»; (b) lo spazio esterno alla calza viene delicatamente piegato in un iperspazio; (c) viene praticato un piccolo buco in un dito della calza, proprio sotto di esso viene praticato un buco nello spazio e i bordi dei buchi vengono «cuciti» assieme. Questa strategia appare classica (macroscopica) a prima vista. Tuttavia, la perforazione produce, almeno momentaneamente, una singolarità dello spaziotempo che è governata dalle leggi della gravità quantistica, quindi, in realtà si tratta di una strategia quantistica.

ziotempo priva di singolarità, ma lo si può fare solo se durante la costruzione anche il tempo diventa contorto dal punto di vista di tutti i quadri di riferimento[6]. Più specificamente, mentre la costruzione procede, deve essere possibile viaggiare sia indietro che in avanti nel tempo; il «macchinario» che effettua la costruzione, qualunque cosa esso sia, deve funzionare brevemente come una macchina del tempo che trasporta le cose dai momenti finali della costruzione ai momenti iniziali (ma non a momenti precedenti l'inizio della costruzione).

La reazione universale al teorema di Geroch, nel 1967, fu: «*Sicuramente* le leggi della fisica proibiscono le macchine del tempo e quindi impediscono a un cunicolo temporale di essere costruito in modo classico, cioè senza praticare buchi nello spazio».

Nei decenni trascorsi dal 1967 alcune cose di cui eravamo *sicuri* si sono dimostrate sbagliate (ad esempio, non avremmo mai creduto nel 1967 che un buco nero potesse evaporare). Questo ci ha resi prudenti. Come manifestazione di questa prudenza, e spinti dalle domande alla Sagan, alla fine degli anni Ottanta abbiamo cominciato a chiederci: «Le leggi della fisica vietano

davvero le macchine del tempo, e se sì, *in che modo*? Come possono le leggi rendere effettivo questo divieto?». Tornerò in seguito su questo punto.

Prendiamoci una pausa e facciamo il punto. Nel 1993 le nostre conoscenze più avanzate sui cunicoli temporali sono le seguenti.

Se nel Big Bang non si fossero formati cunicoli temporali, una civiltà infinitamente avanzata potrebbe tentare di costruirne uno con due metodi, uno quantistico (estraendolo dalla schiuma quantistica) e uno classico (torcendo lo spaziotempo senza perforarlo). *Non* comprendiamo abbastanza le leggi della gravità quantistica, nel 1993, da dedurre se la costruzione quantistica del cunicolo temporale sia possibile. Comprendiamo le leggi della gravità classica (relatività generale) abbastanza bene da sapere che la costruzione classica dei cunicoli temporali è consentita solo se il macchinario con cui si effettua la costruzione, qualunque cosa esso sia, distorce il tempo in modo così estremo, dal punto di vista di qualsiasi quadro di riferimento, da produrre, almeno brevemente, una macchina del tempo.

Sappiamo anche che se una civiltà infinitamente avanzata si procurasse in qualche modo un cunicolo temporale, l'unico modo per tenerlo aperto (in modo da usarlo per i viaggi interstellari) sarebbe quello di immettervi del materiale esotico. Sappiamo che le fluttuazioni del vuoto del campo elettromagnetico costituiscono una forma promettente di materiale esotico: esse possono essere esotiche (possedere una densità media di energia negativa misurata da un fascio di luce) nello spaziotempo curvo in un'ampia varietà di circostanze. Tuttavia, *non* sappiamo ancora se possono essere esotiche all'interno di un cunicolo temporale e in tal modo tenerlo aperto.

Nelle pagine seguenti ipotizzerò che una civiltà infinitamente avanzata si sia procurata in qualche modo un cunicolo temporale e lo stia tenendo aperto grazie a qualche tipo di materiale esotico; e mi chiederò quale altro uso, oltre ai viaggi interstellari, quella civiltà potrebbe trovare per il suo cunicolo.

Macchine del tempo

Nel dicembre del 1986 il quattordicesimo Texas Symposium semestrale sull'astrofisica relativistica si tenne a Chicago. Questi simposi «Texas», ispirati a quello di Dallas del 1963, sono l'ambito in cui si è discusso per la prima volta del mistero dei quasar (capitoli VII e IX) e sono ormai divenuti un'istituzione consolidata. Partecipai al simposio e illustrai i sogni e i progetti per il

LIGO (capitolo X). Mike Morris (il mio allievo dei cunicoli temporali) partecipò anche lui per avere il battesimo del fuoco di fronte alla comunità internazionale dei fisici e degli astrofisici relativisti.

Nei corridoi tra un intervento e l'altro, Morris fece conoscenza con Tom Roman, un giovane assistente della Central Connecticut State University che, vari anni prima, aveva fornito importanti conoscenze sul materiale esotico. La loro conversazione cadde ben presto sui cunicoli temporali. «Se un cunicolo temporale potesse realmente essere tenuto aperto, consentirebbe di compiere viaggi interstellari a una velocità molto superiore a quella della luce», osservò Roman. «Ma questo non significa che lo si potrebbe usare anche per viaggiare indietro nel tempo?».

Quanto ci sentimmo stupidi io e Mike! Naturalmente; Roman aveva ragione. Noi, in realtà eravamo venuti a sapere dei viaggi nel tempo da bambini, grazie a un famoso limerick:

There once was a lady named Bright
who traveled much faster than light.
She departed one day in a relative way
and came home the previous night*.

Con il commento di Roman e il famoso limerick come incitamento, immaginammo facilmente come costruire una macchina del tempo usando due cunicoli temporali che si muovono ad alta velocità l'uno rispetto all'altro[7]. (Non descriverò qui questa macchina del tempo perché è un po' complicata e ce n'è una più semplice e molto più facile da descrivere alla quale arriverò tra poco).

Sono un solitario, mi piace ritirarmi sulle montagne o su una costa isolata, o anche solo su un attico e pensare. Le nuove idee arrivano lentamente e richiedono lunghe fasi di quiete, di tempo da passare indisturbati per venire alla luce; e i calcoli più importanti richiedono giorni o settimane di concentrazione intensa e costante. Una telefonata nel momento sbagliato può far saltare la mia concentrazione facendomi perdere delle ore. Perciò mi nascondo al mondo.

---

* C'era una volta una donna di nome Bice / che viaggiava più veloce della luce. / Partì un giorno relativamente / e tornò a casa la sera precedente.

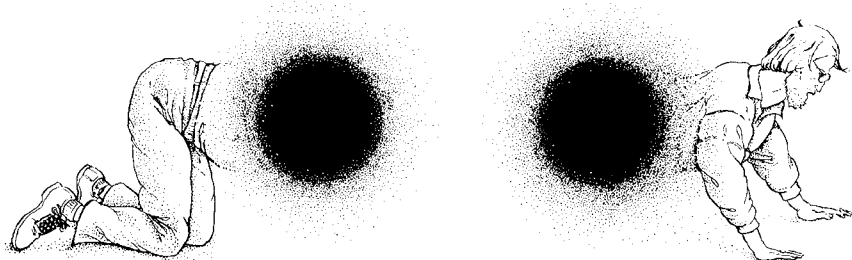
Ma nascondersi troppo a lungo può essere pericoloso. Ho bisogno di tanto in tanto dello stimolo pungente delle discussioni con persone il cui punto di vista e le cui conoscenze siano diversi dai miei.

In questo capitolo ho finora descritto tre esempi. Senza la telefonata di Carl Sagan e la sfida di rendere il suo romanzo scientificamente corretto, non mi sarei mai avventurato nella ricerca sui cunicoli temporali e le macchine del tempo. Senza la lettera di Don Page, Mike Morris e io non avremmo saputo che tutti i cunicoli temporali, a prescindere dalla loro forma, richiedono del materiale esotico per restare aperti. E senza l'osservazione di Tom Roman, io e Mark avremmo potuto restare bellamente ignari del fatto che una civiltà progredita potrebbe facilmente costruire una macchina del tempo con i cunicoli temporali.

Nelle pagine seguenti descriverò altri esempi del ruolo cruciale che svolgono le interazioni stimolanti. Ma non *tutte* le idee nascono in questo modo. A volte nascono dall'introspezione. Un caso del genere si presentò nel giugno del 1987.

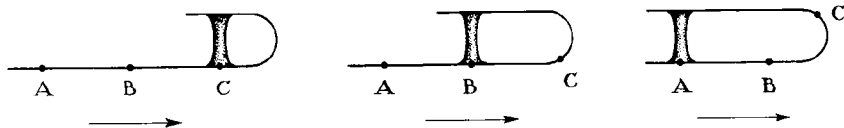
Agli inizi di giugno del 1987, dopo vari mesi di lezioni frenetiche e di interazioni con la mia équipe di ricerca e con quella del LIGO, mi ritirai esausto in isolamento.

Era dall'inizio della primavera che una sottile inquietudine mi serpeggiava dentro e avevo tentato di ignorarla, in attesa di qualche giorno di quiete per riflettere. Quei giorni infine arrivarono. Nel mio isolamento lasciai emergere l'inquietudine dall'inconscio e cominciai a esaminarla: «*Come fa il tempo a decidere in che modo collegarsi con se stesso all'interno di un cunicolo?*». Questo era il nocciolo dell'inquietudine.

Per rendere la domanda più concreta pensai a un esempio: supponiamo che io abbia un cunicolo temporale molto breve, il cui tunnel attraverso l'iperspazio misuri solo trenta centimetri, e supponiamo che entrambe le bocche del cunicolo – due sfere di due metri di diametro ognuna – si trovino nel mio soggiorno a Pasadena. E supponiamo che mi infili nel cunicolo temporale, cominciando dalla testa. Dal mio punto di vista, devo uscire dalla seconda bocca immediatamente dopo essere entrato nella prima, senza nessun intervallo di tempo; in effetti la mia testa esce dalla seconda bocca mentre i miei piedi stanno entrando nella prima. Questo significa che anche mia moglie Carolee, seduta sul divano del soggiorno, vedrà la mia testa uscire dalla seconda bocca mentre i miei piedi stanno ancora entrando nella prima, come nella figura 14.5? Se è così, allora il tempo si collega *all'interno* del cunicolo nella stessa maniera in cui si collega al suo *esterno*.

14.5 – Una mia raffigurazione mentre mi infilo in un ipotetico, brevissimo cunicolo temporale.

D'altra parte, mi chiedevo, non è possibile che sebbene il viaggio attraverso il cunicolo non duri quasi niente dal mio punto di vista, Carolee debba aspettare un'ora prima di vedermi uscire dalla seconda bocca? E non è possibile anche che mi veda uscirne un'ora prima che vi entrassi? Se fosse così, il tempo si collegherebbe *all'interno* del cunicolo in maniera diversa dal suo *esterno*.

Cosa potrebbe mai far comportare il tempo in modo così strano, mi domandai. Del resto, perché non dovrebbe comportarsi così? Solo le leggi della fisica conoscono la risposta, pensai. In qualche modo dovevo riuscire a dedurre dalle leggi della fisica il comportamento del tempo.

Per aiutarmi a capire in che modo le leggi della fisica controllino la connessione del tempo pensai a una situazione più complicata. Supponiamo che una bocca del cunicolo si trovi in stato di quiete nel mio soggiorno e l'altra nello spazio interstellare e si allontani dalla Terra quasi alla velocità della luce. E supponiamo che, malgrado il moto relativo delle sue due bocche, il cunicolo mantenga una lunghezza (la lunghezza del suo tunnel attraverso l'iperspazio) di trenta centimetri (la figura 14.6 spiega come sia possibile che la lunghezza del cunicolo resti fissa di trenta centimetri mentre le sue bocche, dal punto di vista dell'Universo esterno, si muovono l'una rispetto all'altra). Le due bocche, viste dall'Universo esterno, si trovano in quadri di riferimento diversi, quadri che si muovono ad alta velocità l'uno rispetto all'altro, e *le bocche devono pertanto sperimentare flussi del tempo differenti*. Dall'altra parte, viste

14.6 – Spiegazione di come le bocche di un cunicolo temporale possano muoversi l'una rispetto all'altra, viste dall'Universo esterno, mentre la lunghezza del cunicolo resta fissa. Ogni diagramma è un diagramma a incasso come quello della figura 14.1 visto di profilo. I diagrammi sono una sequenza di istantanee che raffigurano il movimento dell'Universo e del cunicolo *rispetto all'iperspazio* (si ricordi, tuttavia, che l'iperspazio è solo un'utile invenzione della nostra immaginazione; non c'è modo per noi esseri umani di vederlo o sperimentarlo nella realtà; si vedano le figure 3.2 e 3.3). Rispetto all'iperspazio, la parte in basso del nostro Universo nel diagramma sta slittando a destra, mentre il cunicolo e la parte in alto del nostro Universo restano in stato di quiete. Analogamente, viste dal nostro Universo, le bocche del cunicolo si stanno muovendo l'una rispetto all'altra (si stanno allontanando), ma viste da dentro il cunicolo sono reciprocamente ferme; la lunghezza del cunicolo non cambia.

dall'interno del cunicolo, le bocche sono in stato di quiete l'una rispetto all'altra e quindi condividono un quadro di riferimento comune, il che significa che *le bocche devono sperimentare lo stesso flusso del tempo.* Dal punto di vista esterno esse sperimentano flussi del tempo diversi; da quello interno, lo stesso flusso. Che cosa sconcertante!

Gradualmente, nel mio isolamento, la confusione si dileguò e tutto divenne chiaro. Le leggi della relatività prevedono, inequivocabilmente, il flusso del tempo nei pressi delle due bocche e prevedono, inequivocabilmente, che i due flussi di tempo siano gli *stessi* se confrontati all'interno del cunicolo, ma *diversi* se confrontati al suo esterno. Il tempo, in questo senso, si connette in modo diverso all'interno del cunicolo rispetto all'Universo esterno quando le due bocche si muovono l'una rispetto all'altra.

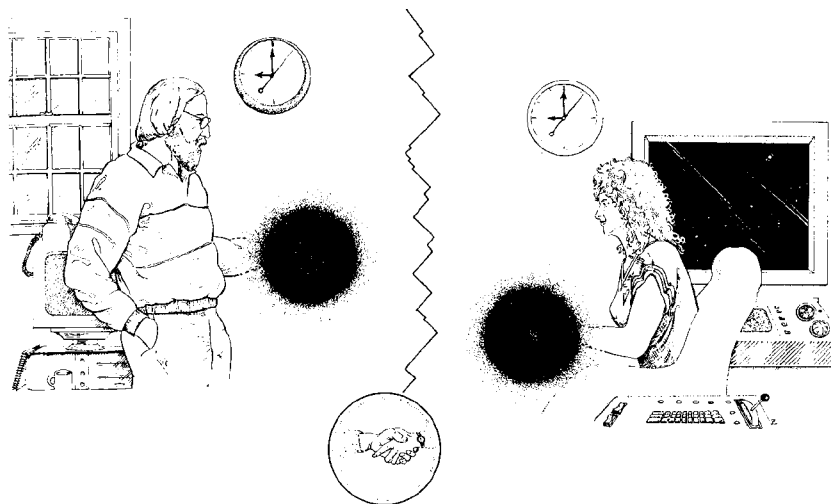
E questa differenza di connessione, mi resi conto, implica che *da un solo cunicolo una civiltà infinitamente avanzata può costruire una macchina del tempo.* Non c'è bisogno di due cunicoli. Come? È semplice, se siete infinitamente progrediti.

Per spiegare come, descriverò un esperimento mentale in cui noi esseri umani siamo esseri infinitamente avanzati. Io e Carolee troviamo un brevis-

simo cunicolo temporale e collochiamo una delle sue bocche nel soggiorno di casa nostra e l'altra sull'astronave di famiglia in giardino.

Ora, come questo esperimento mentale mostrerà, il modo in cui il tempo è connesso con qualsiasi cunicolo dipende in realtà dal passato del cunicolo. Per semplicità, ipotizzerò che quando io e Carolee acquistammo il cunicolo esso avesse la connessione temporale più semplice possibile: la stessa connessione con il suo interno e con l'Universo esterno. In altre parole, se mi infilo nel cunicolo, Carolee, io e chiunque altro sulla Terra concorderà sul fatto che esco dalla bocca sull'astronave essenzialmente nello stesso momento in cui sono entrato nella bocca del soggiorno.

Dopo aver controllato che il tempo sia effettivamente connesso con il cunicolo in questo modo, io e Carolee facciamo un piano: io starò a casa in soggiorno con una bocca, mentre Carolee nella nostra astronave porta con sé l'altra bocca in un viaggio ad altissima velocità nell'Universo e ritorno. Durante il viaggio ci terremo la mano attraverso il cunicolo (figura 14.7).

14.7 – Io e Carolee costruiamo una macchina del tempo a partire da un cunicolo temporale. *A sinistra*: Io mi trovo a casa a Pasadena con una bocca del cunicolo attraverso il quale tengo la mano di Carolee. *A destra*: Carolee trasporta l'altra bocca in un viaggio ad altissima velocità attraverso l'Universo. *Al centro*: Le nostre mani all'interno del buco.

Carolee parte alle 9:00 del mattino il 1° gennaio 2000, dal punto di vista suo, mio e di chiunque altro sulla Terra. Carolee sfreccia via dalla Terra quasi alla velocità della luce per sei ore, misurate secondo il suo tempo; poi inverte la marcia e torna indietro arrivando nel giardino di casa dodici ore dopo la partenza, misurate secondo il suo tempo[8]. Le tengo la mano e la guardo attraverso il cunicolo per tutto il viaggio, perciò ovviamente concordo, mentre guardo attraverso il cunicolo, sul fatto che sia tornata solo dodici ore dopo, alle 21:00 del 1° gennaio 2000. Guardando nel cunicolo alle 21:00 posso vedere non solo Carolee, ma anche, alle sue spalle, il giardino e la nostra casa.

Poi, alle 21:01, mi giro e guardo fuori della finestra, e vedo il giardino vuoto. L'astronave non c'è; Carolee e l'altra bocca del cunicolo non ci sono. Invece, se avessi un buon telescopio puntato fuori della finestra, vedrei l'astronave di Carolee che si allontana dalla Terra nel suo viaggio di andata, un viaggio che, misurato sulla Terra, *guardando attraverso l'Universo esterno*, richiederà dieci anni [questo è il «paradosso dei gemelli» standard; il «gemello» che parte e ritorna ad alta velocità (Carolee) misura un intervallo di tempo di sole dodici ore, mentre il «gemello» che resta sulla Terra (io) deve aspettare dieci anni perché il viaggio si completi].

Poi mi dedico alla routine quotidiana. Giorno dopo giorno, mese dopo mese, anno dopo anno in attesa, finché infine, il 1° gennaio 2010 Carolee torna dal suo viaggio e atterra in giardino. Esco e le vado incontro e trovo, come era da attendersi, che è invecchiata solo di dodici ore, non di dieci anni. È seduta lì nell'astronave, con la mano infilata nella bocca del cunicolo temporale che stringe la mano a qualcuno. Sono in piedi dietro di lei, guardo dentro la bocca e vedo che la persona di cui tiene la mano sono io, dieci anni più giovane, seduto nel nostro soggiorno il 1° gennaio 2000. Il cunicolo è diventato una macchina del tempo. Se adesso (il 1° gennaio 2010) mi infilo nella bocca del cunicolo temporale che sta nell'astronave, uscirò attraverso l'altra bocca nel soggiorno e incontrerò me stesso più giovane. Analogamente, se il mio io più giovane si infila nella bocca del soggiorno il 1° gennaio 2000, uscirà dalla bocca nell'astronave il 1° gennaio 2010. Viaggiare attraverso il cunicolo in una direzione mi riporta indietro di dieci anni, nell'altra mi porta avanti di dieci anni.

Ma né io né nessun altro può usare il cunicolo temporale per viaggiare indietro nel tempo oltre le 21:00 del 1° gennaio 2000. È impossibile viaggiare in un tempo precedente a quello in cui un cunicolo temporale è diventato per la prima volta una macchina del tempo. Le leggi della relatività generale sono inequivocabili. Se il cunicolo temporale può essere mantenuto aperto dal materiale esotico, queste sono le previsioni della relatività generale.

Nell'estate del 1987, più o meno un mese dopo che ero arrivato a queste conclusioni, Richard Price telefonò a Carolee. Richard, un mio caro amico e colui che sedici anni prima aveva dimostrato che un buco nero espelle sempre sotto forma di radiazioni tutti i suoi «peli» (capitolo VII), era preoccupato per me. Aveva saputo che stavo lavorando sulla teoria delle macchine del tempo e temeva che fossi diventato un po' suonato, rimbambito o cose del genere... Carolee lo rassicurò.

La telefonata di Richard mi colpì un po'. Non perché dubitassi della mia sanità mentale, avevo pochi dubbi al riguardo. Tuttavia, se perfino i miei amici più intimi erano preoccuparti, allora (per tutelare almeno Mike Morris e gli altri miei studenti, se non me stesso) dovevo stare bene attento a come presentavo la nostra ricerca alla comunità dei fisici e al pubblico.

Durante l'inverno del 1987-88, osservando questa prudenza, decisi di non affrettarmi a pubblicare qualcosa sulle macchine del tempo. Assieme a due allievi, Mike Morris e Ulvi Yurtsever, concentrai la mia attenzione sul tentativo di capire tutto il possibile sui cunicoli temporali e le macchine del tempo. Solo dopo che ogni aspetto fosse apparso di una chiarezza cristallina avrei pubblicato qualcosa.

Morris, Yurtsever e io lavoravamo insieme connessi al computer e via telefono, perché io mi ero ritirato in isolamento. Carolee aveva ottenuto un incarico come ricercatrice postdoc a Madison, nel Wisconsin, e io ero andato con lei a fare il «casalingo» per i primi sette mesi (gennaio-luglio 1988). Avevo sistemato il mio computer e i tavoli da lavoro nell'attico della casa che avevamo affittato e vi passavo la maggior parte delle mie ore pensando, calcolando e scrivendo, in gran parte per altri progetti, ma in parte anche sui cunicoli e il tempo.

In cerca di stimoli e per mettere le mie idee alla prova con degli interlocutori qualificati, a intervalli di qualche settimana mi recavo a Milwaukee per parlare con un eccellente gruppo di studiosi della relatività diretto da John Friedman e Leonard Parker, e occasionalmente andavo a Chicago per discutere con un altro gruppo eccellente diretto da Subrahmanyan Chandrasekhar, Robert Geroch e Robert Wald.

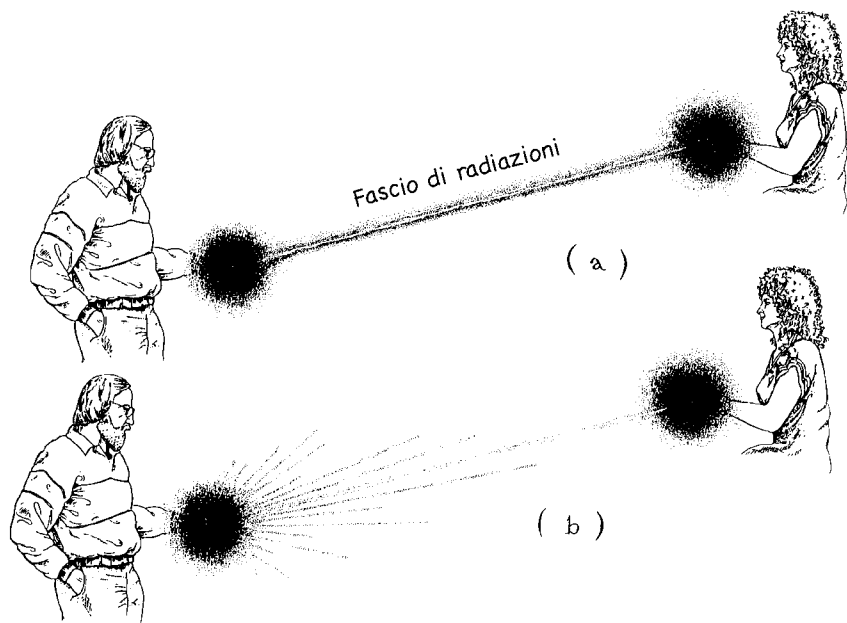
A marzo, durante una visita a Chicago, ebbi uno shock. Tenevo un seminario in cui stavo descrivendo tutto quel che sapevo sui cunicoli temporali e le macchine del tempo, e alla fine Geroch e Wald mi chiesero (proprio così): «*Un cunicolo temporale non dovrebbe distruggersi automaticamente nel momento in cui una civiltà avanzata cercasse di utilizzarlo come macchina del tempo?*».

Perché? Come? Volevo saperlo. Me lo spiegarono. Tradotta nel linguaggio dell'esempio con me e Carolee, la loro spiegazione era la seguente: immaginiamo che Caroline stia sfrecciando, di ritorno verso la Terra, con la bocca di un cunicolo temporale nella sua astronave e che io sieda in casa sulla Terra con l'altra. Poco dopo che ha invertito la marcia e ha cominciato a dirigersi verso la Terra, diventa tutt'a un tratto possibile per le radiazioni (onde elettromagnetiche) usare il cunicolo per viaggiare nel tempo: un quantitativo casuale di radiazione che lasci la nostra casa di Pasadena viaggiando alla velocità della luce verso la sua astronave potrebbe raggiungerla dopo cinque anni (dal punto di vista della Terra), entrare da lì nella bocca del cunicolo, tornare indietro nel giro di cinque anni (dal punto di vista della Terra) e uscire dalla bocca che si trova sulla Terra esattamente nello stesso istante in cui ha iniziato il suo viaggio. La radiazione si accumula sulla parte precedente di sé non solo nello spazio, ma nello spaziotempo, raddoppiando la sua intensità. Ma c'è di più; durante il viaggio ogni quanto di radiazione (ogni fotone) subisce un incremento di energia dovuto al movimento relativo delle bocche del cunicolo (un aumento da «spostamento Doppler»).

Dopo il viaggio successivo verso l'astronave e ritorno attraverso il cunicolo, la radiazione torna di nuovo nello stesso istante della partenza e si accumula di nuovo su se stessa, ancora una volta con un incremento di energia da effetto Doppler. Ciò si ripete in continuazione, rendendo il fascio di radiazioni infinitamente intenso (figura 14.8a).

In questo modo, cominciando con un piccolo quantitativo arbitrario di radiazioni, viene a crearsi un fascio di energia infinita che scorre attraverso lo spazio tra le due bocche del cunicolo temporale. Quando il fascio passa attraverso il cunicolo, sostenevano Geroch e Wald, produce una curvatura dello spaziotempo infinita e probabilmente lo distrugge, impedendogli così di diventare una macchina del tempo.

Partii da Chicago e presi l'Interstatale 90, diretto a Madison, con un certa confusione nella testa. La mia mente era piena di raffigurazioni geometriche di fasci di radiazioni che balenavano da una bocca del cunicolo temporale all'altra mentre le bocche si avvicinavano reciprocamente. Cercavo di calcolare, per immagini, cosa *sarebbe potuto* succedere. Cercavo di capire se Geroch e Wald avevano ragione o meno.

Gradualmente, mentre mi avvicinavo al confine del Wisconsin, le immagini nella mia mente divennero chiare. Il cunicolo temporale *non* sarebbe stato distrutto. Geroch e Wald avevano trascurato un elemento fondamentale: ogni volta che il fascio di radiazioni passa attraverso il cunicolo tempo-

14.8 – (a) Il suggerimento di Geroch e Wald su come un cunicolo temporale possa venire distrutto quando si cerca di trasformarlo in una macchina del tempo. Un intenso fascio di radiazioni sfreccia tra le due bocche e attraverso il cunicolo temporale accumulandosi e rafforzandosi. Il fascio diventa infinitamente carico d'energia e distrugge il cunicolo; (b) quello che accade in realtà. Il cunicolo defocalizza il fascio riducendone l'accumulazione. Il fascio resta debole e il cunicolo temporale non viene distrutto.

rale, quest'ultimo lo defocalizza nel modo indicato nella scheda 14.1. Dopo essere stato defocalizzato, il fascio esce dalla bocca sulla Terra e si diffonde su una vasta porzione di spazio, di modo che solo una piccola frazione di esso può essere catturata dalla bocca sull'astronave e ritrasportata indietro sulla Terra attraverso il cunicolo per «accumularsi» su se stessa (figura 14.8b).

Potevo calcolare la somma visivamente nella mia mente, mentre guidavo. Sommando tutte le radiazioni di tutti i viaggi attraverso il cunicolo (una quantità sempre più ridotta dopo ogni defocalizzazione), calcolai che il fa-

scio finale sarebbe stato debole; fin troppo debole per distruggere il cunicolo temporale.

I miei calcoli si rivelarono giusti, ma, come spiegherò più avanti, avrei dovuto essere più prudente, quel breve incontro con la distruzione del cunicolo avrebbe dovuto mettermi in guardia dai pericoli inaspettati che attendono ogni costruttore di macchine del tempo.

Quando i dottorandi arrivano all'ultimo anno della loro ricerca spesso mi procurano grande soddisfazione. Fanno da soli grandi scoperte, discutono con me e hanno la meglio, mi insegnano cose inaspettate. Questo era il caso di Morris e Yurtsever mentre a poco a poco arrivavamo alla conclusione del nostro articolo per la «Physical Review Letters». Ampie parti dei dettagli tecnici e delle idee tecniche contenuti nell'articolo erano loro.

Mentre il nostro lavoro stava per giungere al termine oscillavo tra il timore di rovinare la reputazione nascente di Morris e Yurtsever, marchiandoli come «fisici da fantascienza», e l'entusiasmo per quanto avevamo imparato e per aver capito che le domande alla Sagan possono essere efficaci nella ricerca in campo fisico. All'ultimo momento, mentre stavamo perfezionando l'articolo, abbandonai la prudenza (atteggiamento che Morris e Yurtsever non sembravano condividere) e concordai con loro di intitolarlo *Cunicoli temporali, macchine del tempo e la condizione dell'energia debole*, (dove quest'ultima rappresenta il termine tecnico associato al «materiale esotico»).

Malgrado nel titolo figurassero le «macchine del tempo», il nostro articolo venne pubblicato senza esitazioni. I due anonimi redattori che dovevano valutarlo sembravano essere in sintonia; tirai un sospiro di sollievo.

All'avvicinarsi della data di pubblicazione, la prudenza prese nuovamente il sopravvento dentro di me. Chiesi allo staff dell'Ufficio pubbliche relazioni del Caltech di evitare e addirittura di eliminare ogni enfasi possibile sulla nostra ricerca relativa alle macchine del tempo. Un approccio sensazionalistico da parte della stampa avrebbe potuto marchiare come folle la nostra ricerca agli occhi di molti fisici, e io volevo che il nostro articolo venisse studiato seriamente dalla comunità dei fisici. Lo staff delle pubbliche relazioni acconsentì.

Il nostro articolo venne pubblicato e andò tutto bene. Come avevo sperato, era sfuggito alla stampa, ma suscitava interesse e polemiche tra i fisici. Poco alla volta cominciarono ad arrivare lettere che ponevano domande e contestavano le nostre affermazioni, ma noi avevamo fatto i compiti, avevamo le risposte.

Le reazioni dei miei amici furono contrastanti. Richard Price continuò a preoccuparsi, aveva stabilito che non ero matto né rimbambito, ma temeva che potessi macchiare la mia reputazione. Il mio amico russo Igor Novikov, invece, era in estasi. In una telefonata da Santa Cruz, dove era *visiting professor*, Novikov disse: «Sono davvero felice, Kip! Hai infranto la barriera. Se puoi pubblicare una ricerca sulle macchine del tempo, allora posso farlo anch'*io*!». Cosa che fece immediatamente.

Il paradosso del matricida

Tra le polemiche sollevate dal nostro articolo la più accesa riguardava quello che chiamerò il *paradosso del matricida*[9]. Se avessi una macchina del tempo (che funziona con un cunicolo temporale o in qualche altro modo) potrei usarla per tornare indietro nel tempo e uccidere mia madre prima che fossi concepito, impedendomi in tal modo di nascere e di uccidere mia madre[10].

Centrale, nel paradosso del matricida, è la questione del *libero arbitrio*: in quanto essere umano, ho o non ho il potere di determinare il mio destino? Posso davvero uccidere mia madre dopo essere tornato indietro nel tempo o (come in molti racconti di fantascienza) qualcosa arresterà inevitabilmente la mia mano mentre sto per pugnalarla nel sonno?

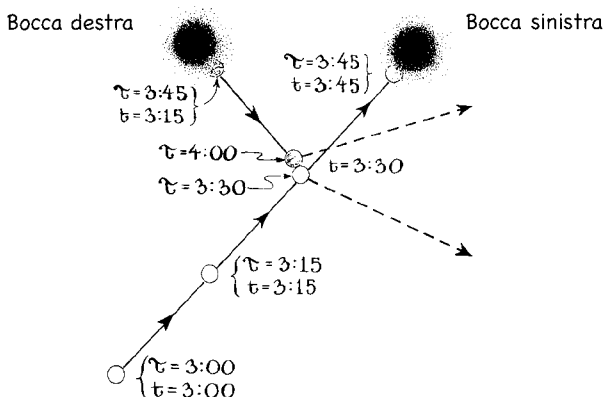
Anche senza macchine del tempo, il libero arbitrio è una questione terribilmente difficile da affrontare per i fisici. Di solito cerchiamo di evitarla. Non fa che confondere questioni che altrimenti apparirebbero chiarissime. Tanto più con le macchine del tempo. Di conseguenza, prima di pubblicare il nostro articolo (ma dopo lunghe discussioni con i nostri colleghi di Milwaukee), io, Morris e Yurtsever decidemmo di evitare del tutto l'argomento del libero arbitrio. Affermammo chiaramente nel testo che non ci occupavamo affatto di esseri umani che usano una macchina del tempo costituita da un cunicolo temporale, ma solo di semplici cose inanimate che viaggiano nel tempo, come le onde elettromagnetiche.

Prima della pubblicazione riflettemmo molto sulle onde che viaggiano indietro nel tempo attraverso un cunicolo temporale; cercammo intensamente paradossi irrisolvibili nell'evoluzione delle onde. Alla fine (con il determinante incoraggiamento di John Friedman), ci convincemmo che, probabilmente, *non vi erano paradossi irrisolvibili*, e ipotizzammo ciò nel nostro articolo[11]. Ampliammo addirittura la nostra congettura avanzando l'ipotesi che non vi siano mai paradossi irrisolvibili per nessun oggetto inanimato che passi attra-

verso il cunicolo temporale. Fu la congettura a sollevare la maggior parte delle polemiche.

Tra le lettere che ricevemmo, la più interessante era di Joe Polchinski, un professore di fisica dell''Università del Texas di Austin. Polchinski scrisse: «Caro Kip... se ho ben capito, stai congetturando che nella tua [macchina del tempo basata su un cunicolo temporale non vi sarebbero paradossi irrisolvibili]. A me sembra che... non sia così». Quindi illustrò un'elegante variante del paradosso del matricida, una variante che non contemplava la questione del libero arbitrio, e che quindi ci sentivamo abbastanza competenti da analizzare.

Prendete un cunicolo temporale che sia stato trasformato in macchina del tempo e collocatene le due bocche in stato di quiete una vicina all'altra nello spazio interplanetario (figura 14.9). Poi, se si lancia una palla da biliardo

14.9 – La versione di Polchinski, basata sulle palle da biliardo, del paradosso del matricida. Il cunicolo temporale è molto breve ed è stato trasformato in una macchina del tempo, in modo che qualsiasi cosa si infili nella sua bocca destra esca trenta minuti prima di esservi entrata, in base alla misurazione del tempo effettuata all'esterno. Il flusso del tempo all'esterno della bocca è indicato con *t*; il flusso del tempo sperimentato dalla palla da biliardo è indicato con *'t*. La palla da biliardo viene lanciata a t = 3:00 dal punto indicato esattamente alla velocità giusta per entrare nella bocca destra alle 3:45. La palla riemerge dalla bocca sinistra trenta minuti prima alle 3:15 e colpisce la versione più giovane di se stessa alle 3:30, modificando la propria traiettoria e impedendosi in tal modo di entrare nella bocca destra e di colpirsi.

verso la bocca destra da una posizione iniziale appropriata e con una velocità iniziale appropriata, la palla entrerà nella bocca destra, viaggerà indietro nel tempo e uscirà da quella sinistra prima di essere entrata in quella di destra (vista da voi e me fuori del cunicolo), e quindi urterà la versione più giovane di se stessa, impedendosi in tal modo di entrare nella bocca destra e poi colpire se stessa.

La situazione, come nel paradosso del matricida, prevede che si viaggi nel tempo e si cambino gli eventi accaduti. Nel paradosso del matricida torno indietro nel tempo e uccidendo mia madre impedisco la mia nascita. Nel paradosso di Polchinski la palla da biliardo viaggia indietro nel tempo e colpendo se stessa si impedisce di viaggiare indietro nel tempo.

Entrambe le situazioni sono illogiche. Come le leggi della fisica devono essere logicamente coerenti tra loro, anche l'evoluzione dell'Universo, governata dalle leggi della fisica, deve essere pienamente coerente con se stessa, o almeno deve esserlo quando l'Universo si comporta in modo classico (non meccanico-quantistico); il regno della meccanica quantistica è un po' più sofisticato. Dato che sia io che la palla da biliardo siamo oggetti spiccatamente classici (ossia, possiamo mostrare un comportamento meccanico-quantistico solo se si effettuano su di noi misurazioni estremamente accurate; si veda il capitolo X), non vi è alcun modo per me o per la palla da biliardo di tornare indietro nel tempo e modificare le nostre storie.

Quindi, cosa accade alla palla da biliardo? Per scoprirlo, io, Morris e Yurtsever concentrammo la nostra attenzione sulle *condizioni iniziali* della palla, ossia sulla sua posizione e velocità iniziali. Ci domandammo se «alle stesse condizioni iniziali previste nel paradosso di Polchinski, esiste un'altra traiettoria della palla da biliardo che, al contrario di quella della figura 14.9, sia una soluzione logica e coerente con se stessa rispetto alle leggi della fisica che governano le palle da biliardo classiche?». Dopo molte discussioni ci trovammo d'accordo sul fatto che la risposta probabilmente era «sì», ma non ne eravamo del tutto certi, e non c'era tempo per accertarcene. Morris e Yurtsever avevano terminato i loro Ph.D. e stavano per lasciare il Caltech per degli incarichi di ricercatori a Milwaukee e a Trieste.

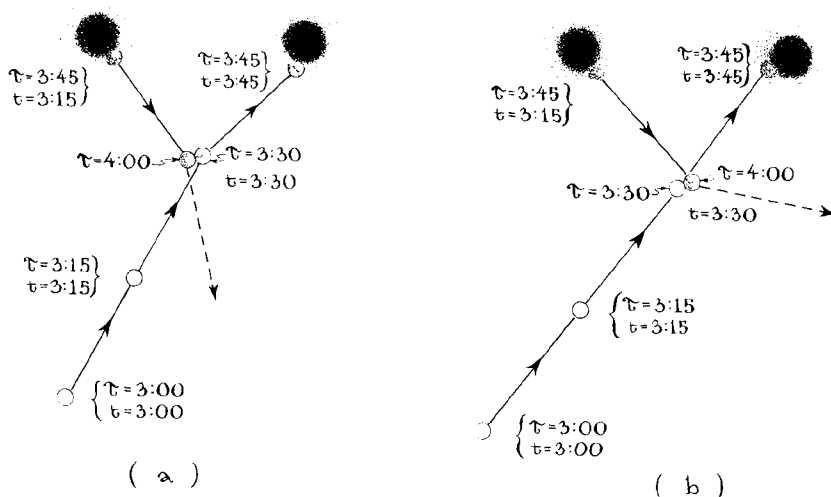
Fortunatamente, il Caltech attira continuamente studenti brillanti. Ce n'erano due nuovi in attesa dietro le quinte, Fernando Echeverria e Gunnar Klinkhammer. Echeverria e Klinkhammer ripresero il paradosso di Polchinski e vi lavorarono sopra: dopo qualche mese di alterni successi con le parti matematiche, essi dimostrarono che esiste effettivamente una traiettoria com-

pleta della palla da biliardo coerente con se stessa che parte dai dati iniziali di Polchinski e soddisfa tutte le leggi della fisica che governano le palle da biliardo classiche. In realtà, di queste traiettorie ne esistono *due*. Esse sono illustrate nella figura 14.10. Descriverò ognuna di queste traiettorie dal punto di vista della palla.

Sulla traiettoria (a) (parte sinistra della figura 14.10) la palla, giovane e immacolata, parte al tempo $t = 3{:}00$ e si muove esattamente lungo la stessa traiettoria del paradosso di Polchinski (figura 14.9), una traiettoria che la porta dritta nella bocca destra del cunicolo temporale. Mezz'ora dopo, a $t = 3{:}30$, la palla giovane e immacolata, viene urtata nella parte posteriore sinistra da una palla dall'aspetto vecchio e consunto (che a sua volta risulta essere la versione più vecchia di se stessa). La collisione è abbastanza leggera da deviare la palla giovane solo lievemente dalla sua traiettoria originale, ma abbastanza energica da fessurarla. La palla giovane, ora fessurata, prosegue lungo la sua traiettoria leggermente modificata ed entra nella bocca del cunicolo a $t = 3{:}45$, viaggia indietro nel tempo di 30 minuti ed esce dall'altra bocca a $t = 3{:}15$. Dato che la sua traiettoria è stata modificata leggermente rispetto a quella del paradosso di Polchinski (figura 14.9), la palla, ormai vecchia e fessurata, urta la versione più giovane di se stessa con un colpetto leggero ma deciso sulla parte posteriore sinistra a $t = 3{:}30$, invece del colpo energico che la faceva deviare decisamente della figura 14.9. L'evoluzione è resa in tal modo pienamente coerente con se stessa.

La traiettoria (b), nella parte destra della figura 14.10, è identica alla (a) eccetto per la geometria della collisione che è leggermente diversa, e di conseguenza lo è anche la traiettoria tra le collisioni. In particolare, la vecchia palla fessurata esce dalla bocca sinistra lungo una traiettoria diversa rispetto ad (a), una traiettoria che la porta davanti alla palla giovane e immacolata (anziché dietro) e le fa assestare un leggero ma deciso colpetto sulla parte anteriore destra (anziché su quella posteriore sinistra).

Echeverria e Klinkhammer dimostrarono che entrambe le traiettorie (a) e (b) soddisfano tutte le leggi della fisica che governano le palle da biliardo classiche, quindi entrambe possono verificarsi nell'Universo reale (se nell'Universo reale possono esistere macchine del tempo costituite da cunicoli temporali).

Questa è la cosa più inquietante. Una simile situazione non può mai prodursi in un universo privo di macchine del tempo. Senza macchine del tempo, ogni insieme di condizioni iniziali relative a una palla da biliardo dà luogo a un'unica traiettoria che soddisfa tutte le leggi classiche della fisica. Vi è un'unica previsione circa il moto della palla. La macchina del tempo ha

14.10 – La soluzione della versione di Polchinski del paradosso del matricida (figura 14.9). Una palla da biliardo che parte alle 3:00 alle stesse condizioni iniziali (stessa posizione nello spazio e stessa velocità) del paradosso di Polchinski può muoversi lungo l'una o l'altra delle due traiettorie raffigurate. Ognuna di esse è pienamente coerente con se stessa e soddisfa le leggi classiche della fisica in ogni punto della traiettoria.

mandato all'aria tutto questo. Ora ci sono due previsioni ugualmente valide riguardo al moto della palla.

In realtà, la situazione è ancora peggiore di quanto sembri a prima vista: la macchina del tempo rende possibile un *numero infinito* di previsioni ugualmente valide riguardo al moto della palla, non solo due. La scheda 14.2 ne illustra un semplice esempio.

Le macchine del tempo fanno impazzire la fisica? Rendono impossibile prevedere come evolveranno le cose? Se non è così, in che modo le leggi della fisica scelgono quale traiettoria, tra l'insieme infinito di quelle consentite, seguirà una palla da biliardo?

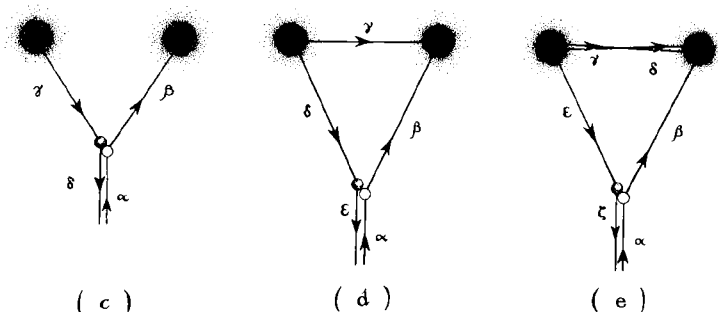
In cerca di una risposta, io e Gunnar Klinkhammer nel 1989 spostammo la nostra attenzione dalle leggi *classiche* della fisica a quelle *quantistiche*. Perché le leggi quantistiche? Perché sono le regolatrici ultime del nostro Universo.

Scheda 14.2

LA CRISI DELLA PALLA DA BILIARDO: UN'INFINITÀ DI TRAIETTORIE

Un giorno, me ne stavo seduto nell'aeroporto di San Francisco in attesa di un volo, quando mi venne in mente che, se una palla da biliardo viene lanciata tra le due bocche di una macchina del tempo costituita da un cunicolo temporale, vi sono due traiettorie lungo le quali può spostarsi. In una (a), sfreccia illesa tra le due bocche. Nell'altra (b), mentre passa tra le due bocche viene urtata e spinta verso la bocca di destra, quindi entra nel cunicolo temporale, esce dalla bocca sinistra prima di entrare, si colpisce e schizza via.

Qualche mese più tardi, Robert Forward [uno dei pionieri dei rilevatori di onde gravitazionali a interferometro laser (capitolo X) nonché scrittore di fantascienza] scoprì una terza traiettoria che soddisfa tutte le leggi della fisica, la traiettoria (c) riportata qui di seguito: la collisione, invece di avvenire tra le due bocche si verifica prima che la palla giunga in prossimità di esse. Allora mi resi conto che si poteva far accadere la collisione sempre più presto, come in (d) ed (e), se la palla viaggia attraverso il cunicolo varie volte tra i due episodi di collisione. Ad esempio, in (e) la palla viaggia lungo il percorso α, viene colpita dalla versione più vecchia di se stessa e spinta lungo β e dentro la bocca destra; poi viaggia attraverso il cunicolo temporale (e indietro nel tempo) fuoriuscendo dalla bocca sinistra in γ, che la conduce di nuovo attraverso il cunicolo (e ancora più indietro nel tempo) per riemergere lungo δ, che la riporta ancora nel cunicolo (e ancora più indietro nel tempo), da cui esce lungo ε, che la conduce all'evento di collisione dove viene deviata verso ζ.

Evidentemente vi è un numero infinito di traiettorie (ognuna con un diverso numero di attraversamenti del cunicolo temporale) che soddisfano le leggi classiche (non quantistiche) della fisica e partono dalle stesse identiche condizioni iniziali (la stessa ubicazione e velocità della palla da biliardo). Viene da chiedersi se la fisica non sia impazzita o se invece le leggi della fisica possano dirci quale traiettoria dovrebbe prendere la palla.

Ad esempio, le leggi della gravità quantistica esercitano il controllo ultimo sulla gravitazione e sulla struttura dello spazio e del tempo. Le leggi classiche della gravità secondo la relatività generale di Einstein sono semplici approssimazioni delle leggi della gravità quantistica, approssimazioni di eccellente precisione quando ci si trova lontano da tutte le singolarità e si osserva lo spaziotempo su scale molto più grandi di 10^{-33} centimetri, ma pur sempre approssimazioni (capitolo XIII).

Analogamente, le leggi classiche della fisica di una palla da biliardo che io e i miei allievi abbiamo usato per studiare il paradosso di Polchinski, sono semplici approssimazioni delle leggi meccanico-quantistiche. Poiché le leggi classiche sembrano prevedere un'«insensatezza» (un'infinità di possibili traiettorie della palla da biliardo), io e Kinkhammer ci rivolgemmo alle leggi della meccanica quantistica in cerca di una maggiore comprensione.

Le «regole del gioco» nella fisica quantistica sono molto diverse da quella classica. Se applicate a delle condizioni iniziali, le leggi classiche prevedono cosa accadrà in seguito (ad esempio, quale traiettoria seguirà una palla), e, in assenza di macchine del tempo, le loro previsioni sono uniche. Le leggi quantistiche, invece, prevedono solo delle *probabilità* che qualcosa accada, non la

certezza (ad esempio, la probabilità che una palla viaggi attraverso questa, quella o un'altra regione dello spazio).

Alla luce delle regole del gioco meccanico-quantistiche, la risposta che io e Klinkhammer ottenemmo dalle leggi della meccanica quantistica non è sorprendente. Scoprimmo che se la palla parte muovendosi lungo la traiettoria del paradosso di Polchinski (figure 14.9 e 14.10 al tempo $t = 3{:}00$) vi sarà una certa probabilità quantistica, diciamo il 48%, che essa segua poi la traiettoria (a) della figura 14.10 e una certa probabilità, diciamo anch'essa del 48%, che segua la (b), e una certa (molto più piccola) probabilità per ognuna dell'infinità di altre traiettorie classiche consentite. In ogni «esperimento» la palla seguirà solo una delle traiettorie consentite dalla leggi classiche, ma se si effettua un numero molto levato di esperimenti identici con la palla da biliardo, nel 48% di essi la palla seguirà la traiettoria (a), nel 48% la traiettoria (b) e così via.

Questa conclusione è abbastanza soddisfacente. Essa suggerisce che le leggi della fisica possono adattarsi abbastanza bene alle macchine del tempo. Vi sono delle sorprese, ma non sembrano esservi previsioni bizzarre, e non c'è traccia di paradossi irrisolvibili. In effetti, sentendo una cosa del genere, il «National Enquirer» potrebbe facilmente titolare: I FISICI PROVANO L'ESISTENZA DELLE MACCHINE DEL TEMPO (questo tipo di assurde distorsioni è stato il mio timore ricorrente).

Nell'autunno del 1988, tre mesi dopo la pubblicazione del nostro articolo *Cunicoli temporali, macchine del tempo e la condizione dell'energia debole*, Keay Davidson, giornalista del «San Francisco Examiner», lo scoprì nella «Physical Review Letters» e lo rese pubblico. Avrebbe potuto andare peggio. Almeno la comunità dei fisici aveva avuto tre mesi di tranquillità per assorbire le nostre idee senza il frastuono dei titoli sensazionalistici.

Ma il frastuono era inarrestabile. FISICI INVENTANO MACCHINE DEL TEMPO, recitava uno dei tipici titoli. La rivista «California», in un articolo su 'L'uomo che ha inventato il viaggio nel tempo', pubblicò addirittura una mia fotografia mentre ero intento alle mie ricerche a torso nudo sul Monte Palomar. Ero mortificato, non dalla foto, ma dalle affermazioni totalmente assurde secondo cui avevo inventato le macchine del tempo e i viaggi nel tempo. *Se le macchine del tempo sono effettivamente ammesse dalle leggi della fisica (e come diverrà chiaro alla fine del capitolo, dubito che lo siano), sono però probabilmente molto più al di là delle attuali capacità tecnologiche della razza umana di quanto lo fossero i viaggi spaziali per i cavernicoli.*

Dopo aver parlato con due giornalisti rinunciai al tentativo di arrestare la marea e far presentare correttamente la questione, e mi nascosi. Il mio assistente amministrativo sotto assedio, Pat Lyon, dovette respingere la stampa con un secco comunicato: «Il professor Thorne ritiene prematuro allo stadio attuale comunicare al pubblico i risultati delle sue ricerche. Quando riterrà di aver compreso in modo più chiaro se le macchine del tempo siano consentite o meno dalle leggi della fisica lo comunicherà con un apposito articolo».

Con questo capitolo del libro sto tenendo fede alla promessa.

Proteggere la cronologia?

Nel febbraio del 1989, quando il chiasso della stampa cominciava a scemare, e mentre io, Echeverria e Klinkhammer ci affannavamo intorno al paradosso di Polchinski, andai a Bozeman, nel Montana, per una conferenza. Lì incontrai Bill Hiscock, un ex-allievo di Charles Misner. Come sono solito fare con molti altri colleghi, lo invitai a darmi il suo parere sui cunicoli temporali e le macchine del tempo. Ero alle ricerca di critiche stringenti, nuove idee, nuovi punti di vista.

«Forse potresti studiare le fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto», mi disse Hiscock. «Forse distruggono il cunicolo temporale quando degli esseri infinitamente avanzati cercano di trasformarlo in una macchina del tempo». Hiscock aveva in mente il tipo di esperimento mentale in cui mia moglie Carolee (per ipotesi infinitamente avanzata) sta facendo ritorno sulla Terra con l'astronave di famiglia e una bocca del cunicolo, mentre io mi trovo sulla Terra con l'altra bocca e il cunicolo temporale è sul punto di diventare una macchina del tempo (figure 14.7 e 14.8). Hiscock ipotizzava che le fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto potessero circolare attraverso il cunicolo alla stessa maniera delle radiazioni della figura 14.8 e, accumulandosi, diventare infinitamente violente e distruggere il cunicolo temporale.

Ero scettico. Un anno prima nel mio viaggio di ritorno da Chicago mi ero convinto che quelle piccole quantità di radiazioni che circolavano attraverso il cunicolo non si accumulassero su se stesse, non creassero un fascio infinitamente carico di energia e non distruggessero il cunicolo. Defocalizzando le radiazioni, il cunicolo si salva. Certamente, pensavo, il cunicolo defocalizzerà anche un fascio di fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto che circoli al suo interno e si salverà.

D'altra parte, pensavo tra me, le macchine del tempo sono un concetto

così radicale nella fisica che occorre esaminare tutto ciò che abbia la minima possibilità di distruggerle. Perciò, malgrado il mio scetticismo, stabilii con un postdoc della mia équipe, Sung-Won Kim, di calcolare il comportamento delle fluttuazioni del vuoto in circolazione nel cunicolo.

Nonostante il notevole aiuto fornitoci dagli strumenti matematici e dalle idee che Hiscock e Deborah Konkowski avevano elaborato qualche anno prima, io e Kim eravamo ostacolati dalla nostra incapacità. Nessuno di noi due era un esperto delle leggi che governano le fluttuazioni del vuoto in circolazione: le leggi quantistiche dei campi nello spaziotempo curvo (capitolo XIII). Ma alla fine, nel febbraio del 1990, dopo tutto un anno di errori e false partenze, i nostri calcoli presero forma e fornirono una risposta.

Ero sorpreso e scioccato. Malgrado il tentativo del cunicolo temporale di defocalizzarle, le fluttuazioni del vuoto tendevano a rifocalizzarsi da sole (figura 14.11). Defocalizzate dal cunicolo, esse si spargevano fuori della bocca sulla Terra come se dovessero mancare l'astronave; poi, da sole, come attratte da una forza misteriosa, puntavano a tutta velocità sulla bocca del cunicolo che si trovava nell'astronave di Carolee. Tornando sulla Terra attraverso il cu-

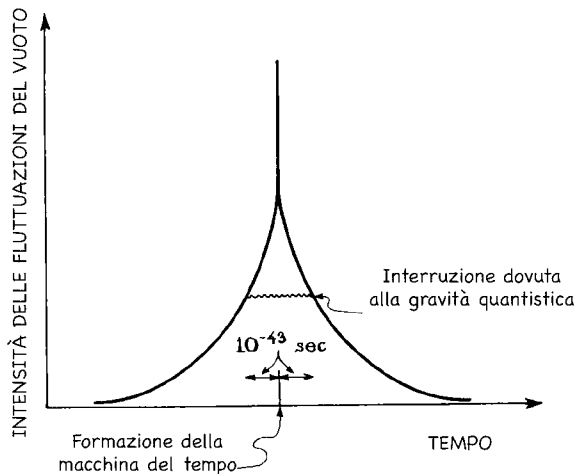
14.11 – Mentre io e Carolee cerchiamo di trasformare un cunicolo temporale in una macchina del tempo con il metodo della figura 14.7, delle fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto sfrecciano attraverso il cunicolo tra le due bocche accumulandosi su se stesse e creando un fascio di enorme energia fluttuante.

nicolo, si spargevano di nuovo fuori della bocca e poi si lanciavano di nuovo verso quella sull'astronave. Ripetevano questo movimento in continuazione, creando un intenso fascio di energia fluttuante.

Questo fascio di fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto sarebbe stato abbastanza intenso da distruggere il cunicolo temporale?, ci chiedemmo io e Kim. Per otto mesi, dal febbraio al settembre 1990, ci arrovellammo su questo punto. Infine, dopo vari tira e molla, giungemmo alla conclusione (sbagliata): «Probabilmente no». Il nostro ragionamento, a noi e a diversi colleghi cui lo sottoponemmo, sembrava convincente, così lo mettemmo per iscritto e lo inviammo alla «Physical Review».

Il nostro ragionamento era il seguente: i nostri calcoli avevano dimostrato che le fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto in circolazione sono infinitamente intense solo per un fugace, breve periodo di tempo. Esse raggiungono un picco esattamente nell'istante in cui è possibile usare per la prima volta il cunicolo temporale per viaggiare indietro nel tempo (ossia, nel momento in cui il cunicolo diventa per la prima volta una macchina del tempo) e poi cominciano immediatamente a scemare (si veda la figura 14.12).

Ora, le (poco conosciute) leggi della gravità quantistica sembrano affer-

14.12 – Evoluzione dell'intensità delle fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto che circolano attraverso un cunicolo temporale subito prima e subito dopo che il cunicolo diventi una macchina del tempo.

mare che non esiste una cosa come un «fugace, breve periodo di tempo». Piuttosto, così come le fluttuazioni della curvatura dello spaziotempo rendono privo di significato il concetto di lunghezza su scale più piccole della lunghezza di Planck-Wheeler, 10^{-33} centimetri (figura 14.3 e relativa discussione), anche le fluttuazioni della curvatura dovrebbero rendere privo di significato il concetto di tempo su scale più piccole di 10^{-43} secondi (il «tempo di Planck-Wheeler», che è uguale alla lunghezza di Planck-Wheeler divisa per la velocità della luce). Intervalli di tempo più brevi di questo non possono esistere, sembrano affermare le leggi della gravità quantistica. I concetti di *prima* e *dopo* ed *evoluzione nel tempo* non hanno senso durante intervalli così brevi.

Pertanto, riflettemmo io e Kim, le fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto in circolazione devono cessare di evolvere nel tempo, ossia devono smettere di aumentare, 10^{-43} secondi prima che il cunicolo temporale diventi una macchina del tempo; le leggi della gravità quantistica devono interrompere la crescita delle fluttuazioni. E le leggi della gravità quantistica lasceranno proseguire l'evoluzione delle fluttuazioni solo 10^{-43} secondi dopo la nascita della macchina del tempo, il che vuol dire dopo che avranno cominciato a scemare. Tra questi due periodi non vi è *tempo* e non vi è evoluzione (figura 14.12). L'aspetto cruciale era quindi: *quanto è diventato intenso il fascio di fluttuazioni in circolazione quando la gravità quantistica ne interrompe la crescita?* I nostri calcoli erano chiari e inequivocabili: il fascio, quando smette di crescere, è troppo debole per danneggiare il cunicolo, e pertanto, per citare letteralmente il nostro articolo, sembrava chiaro che «le fluttuazioni del vuoto non possono impedire la formazione o l'esistenza di curve chiuse di tipo tempo» (espressione che nel gergo dei fisici sta per «macchine del tempo»; essendo rimasto scottato dalla stampa avevo smesso di usare l'espressione «macchine del tempo» nei miei articoli, e la stampa, che non aveva familiarità con il gergo dei fisici, rimaneva ignara dei nuovi articoli che pubblicavo sull'argomento).

Nel settembre del 1990, quando inviammo l'articolo alla «Physical Review», io e Kim ne inviammo una copia a diversi colleghi, compreso Stephen Hawking. Hawking lesse l'articolo con interesse, e non fu della stessa opinione. Egli non aveva niente da ridire sui calcoli relativi al fascio di fluttuazioni del vuoto in circolazione (e infatti un calcolo simile effettuato da Valery Frolov a Mosca aveva già verificato i nostri risultati). Quel che Hawkins aveva da ridire riguardava la nostra analisi degli effetti della gravità quantistica.

Hawking concordava sul fatto che la gravità quantistica probabilmente in-

terrompeva la crescita delle fluttuazioni del vuoto 10^{-43} secondi prima della creazione della macchina del tempo, ossia 10^{-43} prima che esse diventassero infinitamente intense. «Ma 10^{-43} secondi misurati da chi? In quale quadro di riferimento?», egli chiese. Il tempo è «relativo», non assoluto, ci ricordò Hawking; dipende dal quadro di riferimento del soggetto. Io e Kim avevamo ipotizzato che il quadro di riferimento appropriato fosse quello di qualcuno in stato di quiete nella gola del cunicolo. Hawking propendeva invece (in effetti) per un altro quadro di riferimento, quello delle fluttuazioni stesse, o detto più precisamente, il quadro di riferimento di un osservatore che circoli assieme alle fluttuazioni tra la Terra e l'astronave attraverso il cunicolo così velocemente da vedere la distanza tra l'una e l'altra contrarsi da 10 anni luce (10^{19} centimetri) alla lunghezza di Planck-Wheeler (10^{-33} centimetri). Le leggi della gravità quantistica possono prevalere e arrestare la crescita del fascio solo 10^{-43} secondi prima che il cunicolo temporale diventi una macchina del tempo dal punto di vista di un osservatore in circolazione, rifletté Hawking.

Dal punto di vista di un osservatore in stato di quiete all'interno del cunicolo (l'osservatore sul quale ci eravamo basati io e Kim), la congettura di Hawking significava che l'interruzione provocata dalla gravità quantistica avviene 10^{-95} secondi, non 10^{-43}, prima che il cunicolo diventi una macchina del tempo, e a quel punto, secondo i nostri calcoli, il fascio di fluttuazioni del vuoto sarebbe stato abbastanza, ma appena abbastanza, intenso da *poter effettivamente distruggere il cunicolo temporale.*

La congettura di Hawking sulla collocazione dell'interruzione provocata dalla gravità quantistica era stringente. Dopo molte riflessioni io e Kim concludemmo che egli poteva avere ragione e facemmo in modo di modificare il nostro articolo in tal senso prima che venisse pubblicato.

L'ultima riga, tuttavia, era ambigua. Anche se Hawking avesse avuto ragione, era lungi dall'essere chiaro se il fascio di fluttuazioni del vuoto avrebbe distrutto il cunicolo temporale o meno, e per saperlo con certezza avremmo dovuto comprendere cosa fa la gravità quantistica quando prende il sopravvento nell'intervallo di 10^{-95} secondi intorno al momento di formazione della macchina del tempo.

Per farla breve, *le leggi della gravità quantistica ci occultano la risposta alla domanda se i cunicoli temporali possano essere trasformati con successo in macchine del tempo.* Per avere la risposta dobbiamo prima diventare esperti nelle leggi della gravità quantistica.

Hawking ha un'opinione molto decisa sulle macchine del tempo. Egli ri-

tiene che la natura le aborrisca e ha inserito tale convinzione in una congettura, la congettura della *protezione della cronologia*, che afferma che *le leggi della fisica non consentono macchine del tempo* (Hawking, con il suo classico umorismo sorprendente, la descrive come la congettura che «fa del mondo un luogo sicuro per gli storici»).

Hawking sospetta che la crescita del fascio di fluttuazioni del vuoto sia il modo in cui la natura protegge la cronologia: *ogni qualvolta si cerchi di costruire una macchina del tempo, non importa quale meccanismo si usi a tale scopo (un cunicolo temporale, un cilindro rotante*[12]*, una «stringa cosmica»*[13]*, o qualsiasi altra cosa), appena prima che esso diventi una macchina del tempo un fascio di fluttuazioni del vuoto circolerà attraverso il meccanismo e lo distruggerà*. Hawking sembra pronto a scommettere pesantemente su questo risultato.

Non voglio partecipare a questa scommessa. *Amo* fare scommesse con Hawking, ma solo quelle in cui ho una ragionevole possibilità di vittoria. La mia sensazione più profonda mi dice che questa potrei perderla. I calcoli effettuati con Kim e quelli non pubblicati realizzati da Eanna Flanagan (una mia allieva) più di recente, mi lasciano supporre che Hawking potrebbe avere ragione. *Ogni macchina del tempo probabilmente si distruggerà (attraverso le fluttuazioni del vuoto in circolazione) nel momento in cui si cerca di attivarla.* Tuttavia, non possiamo saperlo con certezza finché i fisici non avranno scandagliato in profondità le leggi della gravità quantistica.

EPILOGO

Una panoramica sull'eredità passata e futura di Einstein e un aggiornamento su alcuni personaggi centrali

È passato ormai quasi un secolo intero da quando Einstein distrusse il concetto assoluto di spazio e di tempo di Newton e iniziò a gettare le fondamenta della sua eredità. Nel secolo che è trascorso tale eredità è aumentata fino a comprendere, tra molte altre cose, la deformazione dello spaziotempo e un insieme di oggetti esotici fatti unicamente e interamente di quella deformazione: buchi neri, onde gravitazionali, singolarità (rivestite e nude), cunicoli temporali e macchine del tempo.

In un'epoca o nell'altra i fisici hanno considerato assurdi ognuno di tali oggetti.

- In questo libro abbiamo visto lo scetticismo di Eddington, di Wheeler e dello stesso Einstein riguardo ai *buchi neri*; Eddington e Einstein morirono prima che fosse stato dimostrato in modo convincente che si sbagliavano, ma Wheeler si convertì e divenne un sostenitore dei buchi neri.
- Durante gli anni Quaranta e Cinquanta molti fisici, basandosi su interpretazioni erronee della matematica della relatività generale che stavano studiando, erano profondamente scettici riguardo alle *onde gravitazionali* (increspature della curvatura), ma questa è materia per un altro libro, e quello scetticismo si è dileguato da molto tempo.
- Scoprire che le singolarità sono una conseguenza inevitabile delle leggi della relatività generale di Einstein è stato uno shock orribile per la maggior parte dei fisici, e per molti lo è ancora. Alcuni di essi trovano conforto nella fede nella congettura della censura cosmica di Penrose (secondo cui tutte le singolarità sono rivestite; le singolarità nude sono proibite). Ma che l'ipotesi della censura cosmica sia corretta o meno, la maggior parte dei fisici si è ormai adattata alle singolarità e come Wheeler si aspetta che le poco conosciute leggi della gravità quantistica le tengano a bada, che le

regolino e le controllino nello stesso modo in cui le leggi della gravità di Newton o di Einstein governano i pianeti e controllano le loro orbite attorno al Sole.

- I cunicoli temporali e le macchine del tempo oggi sono considerati un'assurdità dalla maggior parte dei fisici anche se le leggi della relatività generale di Einstein ne consentono l'esistenza. Gli scettici possono tuttavia trovare conforto nella nostra recente scoperta che l'esistenza dei cunicoli temporali e delle macchine del tempo non è regolata dalle leggi piuttosto permissive di Einstein, ma da quelle più restrittive della teoria quantistica dei campi nello spaziotempo curvo e della gravità quantistica. Quando le conosceremo meglio, *forse* quelle leggi ci diranno inequivocabilmente che le leggi fisiche proteggono sempre l'Universo dai cunicoli temporali e dalle macchine del tempo, o almeno da queste ultime. Forse.

Cosa possiamo aspettarci dal prossimo secolo, il secondo dell'eredità di Einstein?

Sembra probabile che la rivoluzione nella nostra concezione dello spazio, del tempo e degli oggetti fatti di deformazione spaziotemporale non sarà inferiore a quella del primo secolo. I semi della rivoluzione sono stati gettati:

- I rilevatori di onde gravitazionali ci forniranno presto mappe osservative dei buchi neri e i suoni delle sinfonie prodotte dalla loro collisione, sinfonie piene di nuove e abbondanti informazioni su come si comporta lo spaziotempo deformato quando vibra violentemente. Le simulazioni dei supercalcolatori cercheranno di replicare le sinfonie e di dirci cosa significhino, e in tal modo i buchi neri diventeranno oggetto di accurati studi sperimentali. Cosa ci insegneranno questi studi? Sarà una sorpresa.
- Infine, nel prossimo secolo, probabilmente più prima che poi, qualche fisico dotato di brillante intuizione scoprirà e svelerà le leggi della gravità quantistica nei loro dettagli più intimi.
- Con le leggi della gravità quantistica a nostra disposizione, potremmo farci un'idea precisa di come sia sorto lo spaziotempo del nostro Universo, come sia emerso dalla schiuma quantistica della singolarità del Big Bang. Potremmo scoprire con certezza il senso, o la mancanza di senso, della tanto spesso sollevata domanda: «Cosa c'era prima del Big Bang?». Potremmo venire a sapere con certezza se la schiuma quantistica produce facilmente universi multipli e tutti i particolari su come lo spaziotempo viene distrutto nella singolarità al centro di un buco nero o nel «big crunch», e

se, come e dove lo spaziotempo viene nuovamente ricreato. E potremmo scoprire se le leggi della gravità quantistica consentono o proibiscono le macchine del tempo: le macchine del tempo devono sempre distruggersi nel momento in cui vengono attivate?
• Le leggi della gravità quantistica non sono il corpus finale di leggi fisiche lungo il percorso che ci ha portato da Newton alla relatività ristretta, alla relatività generale, alla teoria quantistica e quindi alla gravità quantistica. Le leggi della gravità quantistica dovranno ancora essere unificate con le leggi che governano le altre forze fondamentali della natura: la forza elettromagnetica, la forza debole e la forza forte. Probabilmente scopriremo i dettagli di questa unificazione nel prossimo secolo – anche in questo caso più prima che poi – e anche che essa può modificare radicalmente la nostra visione dell'Universo. E poi cos'altro? Credo che nessun essere umano possa fare previsioni oltre questo punto, eppure esso potrebbe venire raggiunto nel corso della mia vita, e della vostra.

In conclusione, novembre 1993

ALBERT EINSTEIN dedicò la maggior parte dei suoi ultimi venticinque anni al vano tentativo di unificare le leggi della relatività generale con le leggi dell'elettromagnetismo di Maxwell; non sapeva che l'unificazione più importante era quella con la meccanica quantistica. Morì a Princeton nel 1955 all'età di settantasei anni.

SUBRAHMANYAN CHANDRASEKHAR, oggi ottantatreenne, continua a scandagliare i segreti dell'equazione di campo di Einstein, spesso in collaborazione con colleghi molto più giovani. In anni recenti ci ha insegnato molto sulle pulsazioni delle stelle e le collisioni delle onde gravitazionali.

FRITZ ZWICKY con l'età divenne meno fisico teorico e più astronomo osservativo, e continuò a produrre idee preveggenti e controverse, anche se non concernenti i temi di questo libro. Andò in pensione dal suo incarico di professore al Caltech nel 1968 e si trasferì in Svizzera, dove dedicò i suoi ultimi anni a promuovere il suo modo di procedere verso la conoscenza: il «metodo morfologico». Morì nel 1974.

LEV DAVIDOVICH LANDAU si riprese intellettualmente, ma non emotivamente dal suo anno di prigionia (1938-39), e continuò a essere la figura dominante e l'insegnante più rispettato tra i fisici teorici sovietici. Nel 1962 rimase gravemente ferito in un incidente automobilistico che gli causò danni

cerebrali, alterò la sua personalità e distrusse la sua capacità di dedicarsi alla fisica. Morì nel 1968, ma come dissero in seguito vari dei suoi amici più intimi, «Per me 'Dau è morto nel 1962».

YAKOV BORISOVICH ZEL'DOVICH è rimasto l'astrofisico più influente del mondo per tutti gli anni Settanta e fino agli anni Ottanta. Tuttavia, nel 1978, in una tragica esplosione interpersonale, si separò dalla maggior parte dei membri della sua équipe di ricerca (la più efficace équipe di astrofisici teorici che il mondo abbia mai visto). Cercò di ricostruirne da capo una con dei giovani colleghi, ma vi riuscì solo in parte, e poi negli anni Ottanta divenne il guru degli astrofisici e dei cosmologi di tutto il mondo. Morì per un attacco cardiaco a Mosca nel 1987, subito dopo che i cambiamenti politici di Gorbacev gli avevano reso possibile recarsi in America per la prima volta.

IGOR DMITRIEVICH NOVIKOV divenne il direttore dell'équipe di ricerca di Zel'dovich dopo la rottura con quest'ultimo. Durante gli anni Ottanta tenne insieme l'équipe con la stessa passione e gli stimoli che Zel'dovich aveva infuso nei vecchi tempi. Tuttavia, senza Zel'dovich, l'équipe era solo una delle migliori al mondo, e non quella di gran lunga superiore a tutte come prima. Dopo il crollo dell'Unione Sovietica nel 1991 e una successiva operazione al cuore che gli fece avvertire i suoi limiti, Novikov si trasferì all'Università di Copenaghen dove sta creando un nuovo centro di astrofisica teorica.

VITALY LAZAREVICH GINZBURG all'età di settantasette anni continua a svolgere ricerche all'avanguardia in diversi campi della fisica e dell'astrofisica. Durante l'esilio a Gorky di ANDREI SAKHAROV tra il 1980 e il 1986, Ginzburg, in quanto suo «capo» all'Istituto Lebedev di Mosca, rifiutò di licenziarlo e gli fece in qualche modo da protettore. Durante la perestroika di Gorbacev, Ginzburg e Sakharov vennero entrambi eletti alla Camera dei deputati del popolo dell'Urss dove si fecero portatori di istanze riformatrici. Sakharov morì per un attacco cardiaco nel 1989.

J. ROBERT OPPENHEIMER, pur ripudiato dal governo degli Stati Uniti nell'ambito delle udienze relative alla concessione del visto di sicurezza del 1954, divenne un eroe per la maggioranza della comunità dei fisici. Non tornò mai a occuparsi di ricerca, ma rimase in stretto contatto con la maggior parte dei settori della fisica e rappresentò l'interlocutore perfetto cui i giovani fisici potevano sottoporre le loro idee, fino a quando non morì di cancro nel 1967.

JOHN WHEELER all'età di ottantadue anni continua nella sua ricerca volta all'unificazione della meccanica quantistica e della relatività generale, e continua a ispirare le generazioni più giovani con le sue lezioni e i suoi scritti, in particolare con il suo recente libro *Gravità e spazio-tempo* (Zanichelli, 1993).

ROGER PENROSE, come Wheeler e molti altri, è ossessionato dall'unificazione della relatività generale e della meccanica quantistica e dalle mal comprese leggi della gravità quantistica che dovrebbero scaturire da tale unificazione. Egli ha esposto le sue idee anticonformiste in un libro rivolto a un pubblico non specializzato (*La mente nuova dell'Imperatore*, Rizzoli 2000). Molti fisici sono scettici sulle sue posizioni, ma Penrose ha avuto ragione molto spesso in precedenza...

STEPHEN HAWKING a sua volta continua a essere ossessionato dalle leggi della gravità quantistica, e in particolare da quali possano essere le previsioni di tali leggi sull'origine dell'Universo. Come Penrose, anch'egli ha scritto un libro non specialistico in cui descrive le sue idee (*Dal Big Bang ai buchi neri – Breve storia del tempo*, Rizzoli 2000). Malgrado la SLA, la salute continua ad assisterlo.

RINGRAZIAMENTI

I miei debiti di riconoscenza verso gli amici
e i colleghi che hanno influenzato questo libro

Elaine Hawkes Watson, con la sua infinta curiosità per l'Universo, mi ha invogliato a intraprendere la realizzazione di questo libro. Nei quindici anni in cui ho scritto e riscritto questo libro ho ricevuto l'inestimabile sostegno e incoraggiamento degli amici intimi e della mia famiglia: Linda Thorne, Kares Thorne, Bret Thorne, Alison Thorne, Estelle Gregory, Bonnie Schumaker e in maniera particolare mia moglie Carolee Winstein.

Sono in debito verso molti dei miei colleghi fisici, astrofisici e astronomi che hanno accettato di farsi intervistare e registrare da me circa le loro ricostruzioni di vari eventi storici e le attività di ricerca descritte in questo libro. I loro nomi sono riportati nell'elenco delle interviste registrate all'inizio della Bibliografia.

Quattro dei miei colleghi, Vladimir Braginsky, Stephen Hawking, Werner Israel e Carl Sagan sono stati così gentili da rileggere l'intero manoscritto e da formulare critiche particolareggiate. Molti altri hanno letto singoli capitoli, o vari di essi, assicurandomi una maggiore correttezza su importanti particolari storici e scientifici: Vladimir Belinsky, Roger Blandford, Carlton Caves, S. Chandrasekhar, Ronald Drever, Vitaly Ginzburg, Jesse Greenstein, Isaac Khalatnikov, Igor Novikov, Roger Penrose, Dennis Sciama, Robert Serber, Robert Spero, Alexi Starobinsky, Rochus Vogt, Robert Wald, John Wheeler e Yakov Borisovich Zel'dovich. Senza i consigli di tali colleghi, questo libro sarebbe molto meno preciso di quanto non sia. Tuttavia, non si deve dedurre che i miei colleghi siano d'accordo con me o approvino tutte le mie interpretazioni della nostra storia comune. Inevitabilmente, vi è stato qualche conflitto tra punti di vista diversi. Nel testo, a scopo pedagogico, sottolineo il mio punto di vista (spesso, ma non sempre, influenzato dalle critiche dei miei colleghi). Nelle Note di approfondimento, per una maggiore precisione storica, illustro alcuni di tali conflitti.

Linda Obst ha fatto a brandelli gran parte della prima versione del libro. La ringrazio. K.C. Cole ha fatto a brandelli la seconda e mi ha pazientemente consigliato a ogni versione successiva finché non ne è stata raggiunta una valida. Sono particolarmente in debito verso K.C. Ringrazio anche Debra Makay per aver corretto meticolosamente il manoscritto finale, è ancora più perfezionista di me.

Il libro è stato significativamente migliorato dalle critiche di diversi lettori estranei alla fisica: Ludmila (Lily) Birladeanu, Doris Drücker, Linda Feferman, Rebecca Lewthwaite, Peter Lyman, Deanna Metzger, Phil Richman, Barrie Thorne, Alison Thorne e Carolee Winstein. Li ringrazio e ringrazio Helen Knudsen per aver individuato molti riferimenti ed eventi, alcuni dei quali incredibilmente oscuri.

Sono stato fortunato a imbattermi nei bei disegni di Matthew Zimet nel libro di Heinz Pagels *Il codice cosmico* (Bollati Boringhieri, 1984), e a convincerlo a illustrare anche il mio libro. Le sue illustrazioni costituiscono un notevole contributo.

Infine, desidero ringraziare il Commonwealth Fund Book Program e specialmente Alexander G. Bearne e Antonina W. Bouis – e anche Ed Barber della W.W. Norton and Company – per il loro sostegno, la loro pazienza e la loro fiducia in me come scrittore durante gli anni che sono occorsi per portare a compimento questo libro.

NOTE

PROLOGO

1. Capitoli III, VI e VII.
2. Capitolo VIII.
3. Capitolo VIII.
4. Capitoli III e VI.
5. Capitolo VI.
6. Capitolo II.
7. I lettori che desiderino calcolare da soli le caratteristiche dei buchi neri troveranno le formule necessarie nelle Note di approfondimento.
8. Capitoli III-V.
9. Capitolo II.
10. Per un'ulteriore discussione del concetto secondo cui le leggi della fisica *obbligano* i buchi neri, il Sistema Solare e l'Universo a comportarsi in certi modi, si vedano gli ultimi paragrafi del capitolo I.
11. Capitolo II.
12. Capitolo VII.
13. Ibid.
14. Ibid.
15. Capitolo III. La quantità 18,5 chilometri, che compare molte volte in questo libro, equivale alla costante gravitazionale di Newton per 4π (ossia 12,5663706...) volte la massa del Sole diviso per il quadrato della velocità della luce. Per questa e altre formule utili a descrivere i buchi neri, si vedano le Note di approfondimento al presente capitolo.
16. Capitolo XIII.
17. Capitoli III e XIII.
18. Capitolo XIII.
19. Si veda la scheda 2.3.
20. Capitoli II e III.
21. Capitolo VI.

22. Capitolo II.
23. Ibid.
24. Capitolo XIII.
25. Ibid.
26. Capitolo I.
27. Ibid.
28. Capitolo II.
29. Capitolo IX.
30. Capitolo VIII.
31. Capitoli II e III.
32. Capitolo II.
33. Capitolo IX.
34. Capitoli IX e XI.
35. Capitolo X.
36. Ibid.
37. Capitolo XII.
38. Capitoli IV-VI, X, XII-XIV.
39. Capitolo XII.
40. Capitolo VII.
41. Ibid.
42. Capitoli VII e XI.
43. Capitoli IX e XI.
44. Capitolo XIV.
45. Capitoli XIII e XIV.
46. Capitolo XIV.
47. Capitoli VIII e IX.
48. Ultimo paragrafo del capitolo I.

CAPITOLO I

1. I lettori che desiderino sapere cosa si intende per «elaborare matematicamente» le leggi della fisica ne troveranno una illustrazione nella sezione dedicata alle Note di approfondimento.
2. Capitolo X.
3. Ciò significa che era un po' scorretto da parte mia usare un'automobile sportiva molto veloce, che subisce la forza di gravità della Terra, nell'esempio che ho fatto in precedenza. Tuttavia, essendo perpendicolare alla direzione del moto dell'automobile (verticale verso il basso l'una, orizzontale l'altro), l'attrazione gravitazionale della Terra non influisce su nessuno degli aspetti discussi in tale esempio.
4. Si veda tuttavia il capitolo XIV per una precisazione.

CAPITOLO II

1. Si veda la nota 1 del capitolo I per i particolari.

2. Non era del tutto ovvio che la legge gravitazionale di Newton violasse il principio della relatività di Einstein, perché quest'ultimo, nel formularlo, si era basato sul concetto di quadro di riferimento inerziale, e tale concetto non poteva essere usato in presenza di gravità (non c'è modo di preservare un quadro di riferimento dalla gravità e quindi di permettergli di muoversi obbedendo unicamente alla propria inerzia). Tuttavia, Einstein era convinto che dovesse esserci un modo di estendere la portata del suo principio della relatività alla sfera della gravità (un modo di «generalizzarlo» per includervi gli effetti gravitazionali), ed era convinto che la legge gravitazionale di Newton avrebbe violato quel «principio generalizzato della relatività» che doveva ancora essere formulato.

3. Capitolo IV e soprattutto scheda 4.1.

4. Einstein usava la nuova dicitura «covarianza generale» per indicare questa proprietà, sebbene fosse solo un'estensione naturale del suo principio della relatività.

CAPITOLO III

1. Capitolo X

2. Si vedano la figura 1.3 e le lezioni del racconto di Mledina e Seronia nel capitolo II.

CAPITOLO IV

1. Per una chiara illustrazione delle leggi della meccanica quantistica si veda *The Cosmic Code*, di Heinz Pagels (Simon and Schuster, 1982).

2. È terribilmente facile, quando si effettua una misurazione delicata, ottenere proprio il risultato che ci si aspetta di dover trovare. La misurazione dello spostamento gravitazionale verso il rosso ne è un esempio. I suoi risultati concordavano con le previsioni, ma queste ultime erano gravemente sbagliate (cinque volte più piccole) a causa degli errori che gli astronomi avevano commesso nello stimare la massa e la circonferenza di Sirio B.

3. L'uso del termine «degenere» non deriva dal concetto di «degenerazione morale» (il *più basso grado possibile di moralità*), ma dal concetto secondo cui gli elettroni hanno raggiunto il *livello più basso possibile di energia*.

4. Nel frattempo, Edmund C. Stoner, aveva dedotto indipendentemente, e pubblicato, l'esistenza di una massa massima delle nane bianche, ma la sua deduzione

era meno convincente di quella di Chandrasekhar perché ipotizzava che la stella avesse una densità costante in tutto il suo interno.

5. Una funzione differenziale combina in un'unica formula diverse funzioni e la misura in cui esse, rispettivamente, cambiano, ossia, le funzioni e le loro «derivate». Nell'equazione differenziale di Chandrasekhar le funzioni erano la densità e la pressione della stella e la forza della sua gravità, ed esse erano funzioni della distanza dal centro della stella. L'equazione differenziale era un rapporto fra tali funzioni e la misura in cui esse cambiano quando nella stella ci si sposta verso l'esterno. Per «risolvere l'equazione differenziale» si intende «calcolare le funzioni stesse a partire dall'equazione differenziale».

CAPITOLO V

1. La quantità di luce ricevuta sulla Terra è inversamente proporzionale al *quadrato* della distanza dalla supernova, quindi un errore di fattore 10 nella distanza significa un errore di fattore 100 nelle stime della emissione totale di luce effettuate da Baade

2. L'antimateria deve il suo nome al fatto che quando una particella di materia ne incontra una di antimateria si annichiliscono reciprocamente.

3. I raggi cosmici risultano essere fatti in molti modi diversi. Non si sa ancora come venga prodotta la maggior parte di essi, ma una forte possibilità è che sia imputabile all'accelerazione di particelle ad alte velocità provocata dalle onde d'urto nelle nubi di gas derivate dalle esplosioni delle supernovae molto tempo dopo che tali esplosioni si sono esaurite. Se è così, indirettamente, Zwicky aveva ragione.

4. La ragione è spiegata nella scheda 4.2.

5. Ciò può apparire sorprendente a chi pensa che la forza nucleare sia molto più potente della forza gravitazionale. La forza nucleare, in effetti, è molto più potente quando si hanno a disposizione solo pochi atomi o nuclei atomici. Tuttavia, quando se ne ha un quantitativo equivalente a varie masse solari (10^{57} atomi) o più, la forza gravitazionale di tutti gli atomi messi insieme può diventare decisamente più potente della loro forza nucleare. Questo semplice fatto alla fine fa sì che, come vedremo più avanti in questo capitolo, quando una stella massiva muore la sua enorme gravità superi la repulsione dei suoi nuclei atomici e li comprima fino a formare un buco nero.

6. La superfluidità è la completa assenza di viscosità (attrito interno) che si verifica in alcuni fluidi quando vengono raffreddati a temperature di pochi gradi superiori allo zero assoluto, raffreddati cioè a quasi meno 270 gradi Celsius.

7. In realtà, la massa massima delle nane bianche nella figura 5.5 (calcoli di Wakano) è 1,2 Soli, leggermente inferiore all'1,4 calcolato da Chandrasekhar. La differenza è dovuta a una diversa composizione chimica: le stelle di Wakano erano

fatte di «materia fredda e morta» (principalmente ferro) in cui gli elettroni solo il 46% rispetto ai nucleoni (neutroni e protoni). Le stelle di Chandrasekhar erano fatte di elementi come elio, carbonio, azoto e ossigeno, che hanno un 50% di elettroni e un 50% di nucleoni. In effetti, la maggior parte delle nane bianche nel nostro Universo sono più simili a quelle di Chandrasekhar che a quelle di Wakano. Questo è il motivo per cui in questo libro cito ampiamente il valore indicato da Chandrasekhar per la massa massima: 1,4 Soli.

CAPITOLO VI

1. Si trovava nei pressi della città di Arzimas, tra Cheliabinsk e i Monti Urali.

2. Dopo aver testato con successo una bomba costruita secondo il progetto americano, i sovietici ripresero il loro progetto, costruirono una bomba in base a esso e la sperimentarono con successo nel 1951.

3. Sakharov ha ipotizzato che questo progetto fosse direttamente ispirato da informazioni acquisite dagli americani attraverso lo spionaggio, forse grazie alla spia Klaus Fuchs. Al contrario, Zel'dovich ha affermato che né Fuchs né nessun'altra spia fornì informazioni significative sulla superbomba che la sua équipe di progettazione non conoscesse già; la funzione principale dello spionaggio sovietico sulla superbomba era quella di convincere le autorità politiche sovietiche che i loro fisici sapevano quello che stavano facendo.

4. Per la cronaca, dissento con forza da Wheeler (malgrado sia uno dei miei migliori amici e mio mentore) e da Sakharov. Per un'attenta e documentata disamina della controversia Teller-Oppenheimer e dei pro e dei contro del dibattito americano sulla costruzione della superbomba raccomando la lettura di Bethe (1982) e York (1976). Sul parere di Sakharov si veda Sakharov (1990), per una critica della posizione di Sakharov si veda Bethe (1990). Per la trascrizione delle udienze del caso Oppenheimer si veda USAEC (1954).

5. La scoperta di Finkelstein era già stata fatta in precedenza, in altri contesti da altri fisici, compreso Eddington, ma essi non ne avevano compreso il significato ed era stata rapidamente dimenticata.

CAPITOLO VII

1. Come ricorda Saul Teukolsky, un compatriota di Bill Press, «Questa conferenza era la risposta di Bill a quella che lui considerava una provocazione: c'era un'altra conferenza in corso alla quale nessuno di noi era stato invitato, mentre tutte le eminenze grigie erano presenti. Così Bill decise di organizzarne una solo per i giovani.

2. Alla fine degli anni Ottanta, su proposta di mia madre, l'intera famiglia ha chiesto di essere scomunicata dalla Chiesa mormone in risposta alla soppressione da parte della Chiesa dei diritti delle donne.

3. Questa idea, pur se corretta, non ha ancora prodotto risultati significativi, e pertanto non la illustrerò in questo libro.

4. L'ho vista manifestarsi in pubblico una sola volta. Nel 1971, in occasione del suo sessantesimo compleanno Wheeler si trovava a un elegante banchetto nel castello di Copenhagen, non in suo onore, ma di una conferenza internazionale, Per celebrare il suo compleanno Wheeler fece esplodere una fila di petardi dietro la sua sedia gettando nel caos gli ospiti vicini a lui.

5. Alla fine degli anni Ottanta è divenuto chiaro che le leggi della meccanica quantistica possono dare luogo a ulteriori quantità conservate, associate ai «campi quantistici» (un tipo di campi illustrato nel capitolo XII); e poiché tali quantità, come la massa, la velocità di rotazione e la carica elettrica di un buco, non possono essere irradiate, una volta che un buco nero si è formato, esse resteranno come «peli quantistici». Sebbene questi peli quantistici possano influenzare notevolmente il destino finale di un buco nero microscopico che sta evaporando (capitolo XII), essi sono privi di conseguenze per i buchi macroscopici (quelli che pesano più del Sole) di cui si tratta in questo capitolo e in quelli seguenti, poiché generalmente la meccanica quantistica è irrilevante su scala macroscopica.

6. Una componente matematica significativa della prova di questa stabilità venne fornita indipendentemente da Stephen Detwailer e James Ipser a Chicago, e una parte mancante di tale prova venne fornita un anno dopo da James Hartle e Dan Wilkins all'università della California a Santa Barbara.

7. Chandrasekhar doveva regalarmi come compenso un abbonamento a *Playboy*, ma mia madre e le mie sorelle, femministe, mi fecero sentire talmente in colpa che invece mi feci regalare un abbonamento a *The Listener*.

CAPITOLO VIII

1. Capitolo VII. I peli costituiti da un campo elettrico di un buco nero dotato di carica elettrica è distribuito omogeneamente intorno al suo asse di rotazione e perciò non può produrre un fascio concentrato.

CAPITOLO IX

1. Con *luce* in questo libro intendo sempre il tipo di onde elettromagnetiche visibili per l'occhio umano, ossia le radiazioni ottiche.

2. Si veda la figura 7.3. Ginzburg è noto non tanto per queste scoperte, ma per un'altra: l'elaborazione, insieme a Lev Landau della «teoria Ginzburg-Landau» sulla superconduttività (ossia una spiegazione di come mai alcuni metalli, portati a temperature molto basse, perdano ogni resistenza al fluire dell'elettricità). Ginzburg è uno dei pochi, autentici «fisici rinascimentali» del mondo, un uomo che ha dato un contributo significativo in quasi tutti i campi della fisica teorica.

3. Si veda la voce «Antimateria» del Glossario e la nota 2 del capitolo V.

4. I campi magnetici sono stati costruiti continuamente nel corso della storia dell'Universo dai movimenti del gas stellare e interstellare e, una volta che sono stati generati, è estremamente difficile liberarsi dei campi magnetici. Quando si accumula nel disco di accrezione, il gas interstellare porta i campi magnetici con sé.

5. Il termine «quasar» è l'abbreviazione di «quasi stellare».

CAPITOLO X

1. Il fattore $1/30$ deriva da calcoli dettagliati effettuati con l'equazione di campo di Einstein. Esso include un fattore $1/(2\pi)$, che è approssimativamente $1/6$ per convertire la circonferenza del buco nel suo raggio, e un fattore addizionale $1/5$ che deriva dai calcoli dell'equazione di campo di Einstein.

2. I loro laser, in realtà producevano microonde (onde radio a lunghezza d'onda corta) anziché luce, e venivano quindi chiamati *maser* invece di laser. Solo diversi anni dopo sono stati costruiti con successo i «veri» laser, quelli che producono luce.

3. Braginsky ha una notevole padronanza delle sfumature della lingua inglese; egli può coniare un'espressione eloquente in inglese per descrivere una nuova idea molto più prontamente della maggior parte degli americani e degli inglesi.

4. Un elemento fondamentale di questa idea ci venne da un collega, William Unruh, dell'Università della British Columbia. Io e Caves elaborammo l'idea e le sue conseguenze insieme ad altri tre colleghi che erano al nostro tavolo quando facemmo la scoperta: Ronald Drever, Vernon Sandberg e Mark Zimmermann.

5. Il concetto è descritto per intero da Caves et al. (1980) e da Braginsky, Vorontsov e Thorne (1980).

6. Queste differenze, le loro conseguenze e i particolari relativi alle onde che ci si può aspettare vengano emesse da diverse sorgenti astrofisiche sono state illustrate da molti teorici compresi, tra gli altri, Thibault Damour a Parigi, Leonid Grishchuk a Mosca, Takashi Nakamura a Kyoto, Bernard Schutz in Galles, Stuart Shapiro a Ithaca, New York, Clifford Will a St. Louis e me.

7. Al di sotto di circa un ciclo al secondo i cavi cui sono sospese le masse impediscono a esse di oscillare in risposta alle onde.

8. In realtà i dettagli relativi al miglioramento sono molto più complicati di così, e la maggiore sensibilità che ne deriva è molto più difficile da ottenere di quanto

lascino intendere queste parole; in ogni modo, a grandi linee questa descrizione è corretta.

9. Ma quelle di Glasgow e del Caltech erano in stretto contatto attraverso Drever.

10. Questi, alla data del 1993, comprendono tra gli altri l'équipe di Braginsky a Mosca, un'équipe diretta da Bob Byers alla Stanford University, un'équipe diretta da Jim Faller all'Università del Colorado, un'équipe diretta da Peter Saulson alla Syracuse University, e una diretta da Sam Finn alla Northwestern University

11. Dal nome dell'ammasso di galassie Virgo, le cui onde potrebbero venire rilevate.

CAPITOLO XI

1. Si confronti con l'ultimo paragrafo del primo capitolo, *La natura della legge fisica*.

2. Qui il termine «polarizza» è usato in modo diverso rispetto a quando si parla di «onde gravitazionali polarizzate» o di «luce polarizzata» (capitolo X).

CAPITOLO XII

1. Può sembrare controintuitivo che il teorema dell'incremento dell'area di Hawking permetta alla massa dei buchi di essere emessa in qualsiasi misura sotto forma di onde gravitazionali. I lettori a loro agio con l'algebra potranno trovare soddisfazione nell'esempio di due buchi non rotanti che si fondono dando luogo a un solo buco nero non rotante più grande. L'area della superficie di un buco non rotante è proporzionale al quadrato della circonferenza del suo orizzonte, che a sua volta è proporzionale al quadrato della massa del buco. Pertanto, il teorema di Hawking afferma che la somma dei quadrati delle masse dei buchi iniziali deve essere inferiore al quadrato della massa del buco finale. Un po' di algebra basta a dimostrare che questo limite relativo alle masse permette alla massa del buco finale di essere inferiore alla somma delle masse dei buchi iniziali, e ciò consente l'emissione di parte delle masse iniziali sotto forma di onde gravitazionali.

2. Una definizione più precisa dell'orizzonte apparente si trova nella scheda 12.1.

3. Le leggi della meccanica quantistica garantiscono che il numero di modi in cui possono essere distribuiti gli atomi e le molecole è sempre finito, e mai infinito. Nel definire l'entropia i fisici spesso moltiplicano il logaritmo di questo numero di modi per una costante che per noi sarà irrilevante, $\log_e 10 \times k$, dove $\log_e 10$ è il «logaritmo naturale» di 10, ossia 2,30258… e k è la «costante di Boltzmann», 1,38062 x 10^{-16} erg per grado Celsius. In questo libro ignorerò tale costante.

4. L'area di Planck-Wheeler è data dalla formula $G\hbar/c^3$, dove $G = 6{,}670 \times 10^{-8}$ dine-centimetro^2 /grammo^2 è la costante gravitazionale di Newton, $\hbar = 1{,}055 \times 10^{-27}$ erg-secondo è la costante di Planck della meccanica quantistica, e $c = 2{,}998 \times 10^{10}$ centimetro/secondo è la velocità della luce. Per gli aspetti connessi a questo punto si vedano la nota II del capitolo XIII, la nota VI del capitolo XIV, e le relative discussioni illustrate nel testo di tali capitoli.

5. Il logaritmo di $10^{10^{79}}$ è 10^{79} (l'entropia ipotizzata da Bekenstein). Si noti che $10^{10^{79}}$ è 1 seguito da 10^{79} zeri, ossia quasi tanti zeri quanti sono gli atomi dell'Universo.

6. Vorobyeskovye Shosse è stata poi ribattezzata via Kosigin e gli edifici sono stati rinumerati. Alla fine degli anni Ottanta Mikhail Gorbacev abitava al numero 10, qualche porta più a ovest di Zel'dovich.

7. Si veda l'ultimo paragrafo del capitolo I: «La natura della legge fisica».

8. In linguaggio tecnico, le parti esterne sono nella «zona di campo lontano» mentre quelle interne nella «zona di campo vicino».

9. Si ricordi che i fotoni e le onde elettromagnetiche sono aspetti diversi della stessa cosa; si veda l'illustrazione del dualismo onda/particella nella scheda 4.1.

10. Questa mancanza di interesse era tanto più notevole perché nel frattempo Charles Misner in America aveva dimostrato che le onde reali (invece delle fluttuazioni del vuoto di Zel'dovich) potevano venire amplificate da un buco nero rotante in modo analogo a quello della figura 12.1, e questa amplificazione – cui Misner diede il nome di «superradianza» – stava suscitando grande interesse.

11. Il «quasi» tiene conto di alcune ambiguità in una procedura chiamata «rinormalizzazione» mediante la quale si calcola l'energia netta trasportata dalle fluttuazioni del vuoto. Queste ambiguità, individuate e codificate da Robert Wald (un ex allievo di Wheeler), non influiscono sull'evaporazione di un buco nero, e probabilmente non verranno risolte finché non sarà disponibile una teoria completa della gravità quantistica.

12. Alcuni lettori potrebbero avere già familiarità con questi concetti nel contesto della materia e dell'antimateria, ad esempio, un elettrone (che è una particella di materia) e un positrone (che è un'antiparticella). Come il campo elettromagnetico è l'aspetto sotto forma di campo di un fotone, esiste anche un campo di elettroni che è l'aspetto sotto forma di campo dell'elettrone e del positrone. In luoghi in cui le fluttuazioni del vuoto del campo di elettroni sono momentaneamente ampie, è probabile che un elettrone virtuale e un positrone virtuale si manifestino, in coppia; quando le fluttuazioni del campo si attenuano è probabile che l'elettrone e il positrone si annichiliscano l'un l'altro e scompaiano. Il fotone è la sua stessa antiparticella, perciò i fotoni virtuali possono manifestarsi e scomparire a coppie, e in modo analogo, anche i gravitoni.

13. Si ricordi che, poiché sono totalmente convertibili l'una nell'altra, massa ed energia sono solo nomi diversi dello stesso concetto.

14. Lo strano fattore 0,10857… è in realtà $1/(4\log_e 10)$, dove $\log_e 10 = 2{,}30258\ldots$ deriva dalla mia scelta di «normalizzazione» dell'entropia; si veda la nota 3 di questo capitolo.

CAPITOLO XIII

1. In gergo tecnico diciamo che la singolarità è «di tipo spazio».

2. 10^{-43} secondi è il *tempo di Planck-Wheeler*. Esso è dato approssimativamente dalla formula $\sqrt{G\hbar/c^5}$, dove $G = 6{,}670 \times 10^{-8}$ dine-centimetri^2/grammi^2 è la costante gravitazionale di Newton, $\hbar = 1{,}055 \times 10^{-27}$ erg al secondo è la costante quantistica di Planck, e $c = 2{,}998 \times 10^{10}$ centimetro/secondo è la velocità della luce. Si noti che il tempo di Planck-Wheeler è uguale alla radice quadrata dell'area di Planck-Wheeler (capitolo XII) divisa per la velocità della luce.

3. La descrizione precedente è basata sull'approccio Wheeler-DeWitt, Hawking-Hartle alla formulazione delle leggi della gravità quantistica. Malgrado il loro non sia che uno dei molti approcci attualmente utilizzati, gli attribuisco buone possibilità di successo.

CAPITOLO XIV

1. Si veda il paragrafo *Approssimazioni* del capitolo XIII.

2. Nel linguaggio tecnico si dice che il materiale esotico «viola in media la condizione dell'energia debole».

3. Si vedano soprattutto le pagine 347, 348 e 406 del libro di Sagan, dove la condizione esotica (densità di energia media negativa dal punto di vista dei fasci luminosi che attraversano il cunicolo) è espressa in modo diverso ma equivalente: visto da un soggetto in stato di quiete all'interno del cunicolo, il materiale deve avere una tensione ampia, in direzione radiale, una tensione superiore alla densità dell'energia del materiale; ed.it. Rizzoli 1975.

4. Capitolo XIII.

5. La lunghezza di Planck-Wheeler è la radice quadrata dell'area di Planck-Wheeler (che entrava nella formula dell'entropia di un buco nero, capitolo XII); essa è data dalla formula $\sqrt{G\hbar/c^3}$, dove $G = 6{,}670 \times 10^{-8}$ dine-centimetri^2/grammi^2 è la costante gravitazionale di Newton, $\hbar = 1{,}055 \times 10^{-27}$ erg-secondo è la costante quantistica di Planck, e $c = 2{,}998 \times 10^{10}$ centimetro/secondo è la velocità della luce.

6. Vorrei poter disegnare un'immagine semplice e chiara per mostrare come viene effettuata questa creazione omogenea di un cunicolo temporale, ma purtroppo non posso.

7. Questa macchina del tempo e le altre descritte più avanti in questo capitolo

non sono affatto la prima soluzione basata su una macchina del tempo dell'equazione di campo di Einstein che siano state inventate. Nel 1937 W. J. Van Stockum a Edimburgo scoprì una soluzione in cui un cilindro infinitamente lungo che ruota velocemente funziona come una macchina del tempo. I fisici hanno a lungo obiettato che niente nell'Universo può essere infinitamente lungo e hanno sospettato (ma nessuno lo ha provato) che, se la lunghezza del cilindro venisse resa finita cesserebbe di essere una macchina del tempo. Nel 1949 Kurt Gödel all'Institute for Advanced Studies di Princeton trovò una soluzione dell'equazione di Einstein che descrive un intero universo che ruota ma non si espande né contrae, e in cui si può viaggiare indietro nel tempo semplicemente allontanandosi a grandi distanze dalla Terra e tornando indietro. I fisici obiettano, ovviamente, che il nostro Universo reale non somiglia affatto alla soluzione di Gödel: *non ruota*, almeno non molto e *si espande*. Nel 1976 Frank Tipler ha usato l'equazione di campo di Einstein per dimostrare che, per creare una macchina del tempo in una regione dello spazio di dimensioni finite, si deve usare del materiale esotico come elemento della macchina (dato che in ogni cunicolo attraversabile deve essere immesso del materiale esotico, la macchina del tempo basata sul cunicolo temporale descritta in questo capitolo soddisfa il requisito di Tippler).

8. In realtà, se Carolee dovesse raggiungere la velocità della luce e tornare indietro così rapidamente, l'accelerazione sarebbe così forte che la ucciderebbe e mutilerebbe il suo corpo. Tuttavia, nello spirito dell'esperimento mentale di un fisico, farò finta che il suo corpo sia fatto di un materiale così resistente da sopportare agevolmente una simile accelerazione.

9. Nella maggior parte della letteratura fantascientifica, viene usata l'espressione «paradosso del nonno» anziché «paradosso del matricida». Presumibilmente il cortese autore maschile che prevale tra chi scrive di fantascienza si sente più a suo agio allontanando l'assassinio di una generazione e scegliendo un uomo come vittima.

10. Io e i miei quattro fratelli siamo molto rispettosi e obbedienti nei confronti di mia madre; si veda, ad esempio, la nota 2 al capitolo VII. Di conseguenza ho chiesto e ottenuto da mia madre il permesso di usare questo esempio.

11. Tre anni più tardi John Friedman e Mike Morris riuscirono insieme a provare in modo rigoroso che quando delle onde viaggiano indietro nel tempo attraverso un cunicolo temporale, non vi sono paradosi irrisolvibili, purché le onde si sovrappongano linearmente nel modo indicato nella scheda 10.3.

12. Si veda la nota 8 di questo capitolo.

13. Recentemente Richard Gott della Pinceton University ha scoperto che si può costruire una macchina del tempo prendendo due stringhe cosmiche infinitamente lunghe (oggetti ipotetici che potrebbero esistere o meno nell'Universo reale) e muovendole l'una accanto all'altra a velocità molto elevata.

PERSONAGGI*

Elenco dei personaggi significativi che compaiono in diversi punti del libro

BAADE, WALTER (1893-1960), Astronomo ottico americano, tedesco di nascita; insieme a Zwicky elaborò il concetto di Supernova e la sua connessione con le stelle di neutroni (capitolo V); ha individuato le galassie associate alle radiosorgenti cosmiche (capitolo IX).

BARDEEN, JAMES MAXWELL (1939-), Fisico teorico americano; dimostrò che molti buchi neri, o la maggior parte di essi, presenti nel nostro Universo devono ruotare velocemente e, insieme a Petterson, predisse l'influenza della rotazione dei buchi sui circostanti dischi di accrezione (capitolo IX); insieme a Carter e a Hawking scoprì le quattro leggi della meccanica dei buchi neri (le leggi dell'evoluzione dei buchi neri; capitolo XII).

BEKENSTEIN, JACOB (1947-), Fisico teorico israeliano; allievo di Wheeler; assieme a Hartle dimostrò che non è possibile attraverso uno studio fatto dall'esterno dei buchi neri stabilire quale tipo di particelle facevano parte del materiale che gli ha dato forma (capitolo VII); ha avanzato l'ipotesi che l'area della superficie di un buco nero sia la sua entropia sotto mentite spoglie e ha alimentato una disputa con Hawking avendo infine la meglio (capitolo XII).

BOHR, NIELS HENDRIK DAVID (1885-1962), Fisico teorico danese; premio Nobel; uno dei fondatori della meccanica quantistica, mentore di molti dei principali fisici della metà del XX secolo compresi Lev Landau e John Wheeler; consigliò Chandrasekhar nella sua battaglia contro Eddington (capitolo 4); cercò di salvare Lan-

* Le seguenti descrizioni servono solo da promemoria e riferimento incrociato per le diverse apparizioni, nel corso del libro, dei singoli personaggi. Esse non intendono rappresentare dei cenni biografici (la maggior parte dei soggetti in questione ha dato grandi contributi alla scienza che non sono rilevanti ai fini di questo libro e pertanto non vi sono elencati). Il criterio principale per l'inserimento in questa sezione *non* è l'importanza dei loro contributi, ma la loro molteplice presenza in diversi punti del libro.

dau dalla prigione (capitolo V); ha sviluppato assieme a Wheeler la teoria della fissione nucleare (capitolo VI).

BRAGINSKY, VLADIMIR BORISOVICH (1931-), Fisico sperimentale russo, ha scoperto i limiti della meccanica quantistica rispetto alla precisione delle misurazioni fisiche, comprese quelle dei rilevatori di onde gravitazionali (capitolo X); inventore del concetto di dispositivi di misurazione «senza demolizione quantistica» che ovviano a tali limiti (capitolo X).

CARTER, BRANDON (1942-), Fisico teorico australiano; allievo di Dennis Sciama a Cambridge; successivamente si trasferì in Francia; ha individuato le proprietà dei buchi neri rotanti (capitolo VII); assieme ad altri ha dimostrato che un buco nero non ha peli (capitolo VII); insieme a Bardeen e Hawking ha scoperto le quattro leggi della meccanica dei buchi neri (le leggi dell'evoluzione dei buchi neri; capitolo XII).

CHANDRASEKHAR, SUBRAHMANYAN (1910-1995), Fisico americano, indiano di nascita; premio Nobel; ha dimostrato l'esistenza di un limite massimo per quanto riguarda la massa delle nane bianche e ha sostenuto una battaglia con Eddington sulla correttezza di tale previsione (capitolo IV); ha elaborato gran parte della teoria sulla risposta dei buchi neri alle piccole perturbazioni (capitolo VII).

EDDINGTON, ARTHUR STANLEY (1882-1944), Astrofisico inglese; tra i principali primi sostenitori delle leggi della relatività generale di Einstein (capitolo III); strenuo oppositore del concetto di buco nero e della conclusione di Chandrasekhar secondo cui esisteva un limite massimo per la massa delle nane bianche (capitoli III e IV).

EINSTEIN, ALBERT (1879-1955), Fisico teorico svizzero-americano, tedesco di nascita; premio Nobel; ha formulato le leggi della relatività ristretta (capitolo I) e della relatività generale (capitolo II); ha dimostrato che la luce è simultaneamente una particella e un'onda (capitolo IV); si è opposto al concetto di buco nero (capitolo III).

GEROCH, ROBERT (1942-), Fisico teorico americano; allievo di Wheeler; assieme ad altri ha elaborato i metodi globali per analizzare i buchi neri (capitolo XIII); ha dimostrato che la topologia dello spazio può cambiare (ad esempio, quando si forma un cunicolo temporale) solo se nel processo si forma una macchina del tempo (capitolo XIV); assieme a Wald ha fornito il primo argomento che suggerisce l'ipotesi che una macchina del tempo si distrugga ogniqualvolta si cerchi di costruirne una (capitolo XIV).

GIACCONI, RICCARDO (1931-), Fisico sperimentale e astrofisico americano, italiano di nascita; ha diretto l'équipe che ha scoperto la prima stella a raggi X nel 1962 utilizzando un rilevatore lanciato con un razzo (capitolo VIII); ha diretto l'équipe che ha progettato e costruito il satellite a raggi X Uhuru, che ha fornito la prima solida prova basata sui raggi X del fatto che Cygnus X-1 è un buco nero (capitolo VIII).

[Ha vinto il premio Nobel per la fisica nel 2002 (NdR)].

GINZBURG, VITALY LAZAREVICH (1916-2009), Fisico teorico sovietico; ha inventato il combustibile LiD per la bomba all'idrogeno sovietica ed è stato poi allontanato

dal progetto (capitolo VI); con Landau ha elaborato una spiegazione delle origini della superconduttività (capitoli VI e IX); ha scoperto la prima prova del fatto che un buco nero non ha peli (capitolo VII); ha elaborato una spiegazione basata sulla radiazione di sincrotrone dell'origine delle onde radio cosmiche (capitolo IX).

GREENSTEIN, JESSE L. (1909-2002), Astronomo ottico americano; collega di Zwicky (capitolo V); assieme a Fred Whipple aveva trovato impossibile spiegare le onde radio cosmiche U (capitolo IX); ha dato avvio alla ricerca sulla radioastronomia in America (capitolo IX); assieme a Marten Schmidt ha scoperto i quasar (capitolo IX).

HARTLE, JAMES B. (1939-), Allievo di Wheeler; assieme a Bekenstein dimostrò che non si può distinguere, dallo studio esterno di un buco nero quali tipi di particelle c'erano nel materiale che gli ha dato vita (capitolo VII); assieme a Hawking ha scoperto le leggi che governano l'evoluzione dell'orizzonte di un buco nero (capitolo XII); sempre con Hawking sta cercando di raggiungere una maggiore comprensione delle leggi della gravità quantistica (capitolo XIII).

HAWKING, STEPHEN W. (1942-), Fisico teorico inglese: allievo di Sciama; ha elaborato parti fondamentali della prova che un buco nero non ha peli (capitolo VII); assieme a Bardeen e Carter ha scoperto le quattro leggi della meccanica dei buchi neri (le leggi dell'evoluzione dei buchi neri); (capitolo XII); ha scoperto che, se si ignorano le leggi della meccanica quantistica, l'area della superficie dei buchi neri può solo aumentare, ma la meccanica quantistica li fa evaporare e contrarre (capitolo XII); ha dimostrato che dei buchi neri minuscoli potrebbero essersi formati nel Big Bang e, assieme a Page, ha stabilito dei limiti osservativi su tali buchi neri primordiali basasti sul fatto che gli astronomi non rilevano i raggi gamma prodotti dalla loro evaporazione (capitolo XII); ha elaborato metodi globali (topologici) per analizzare i buchi neri (capitolo XIII); assieme a Penrose ha dimostrato che il Big Bang conteneva una singolarità (capitolo XIII); ha formulato la congettura della protezione della cronologia, attuata attraverso le fluttuazioni del vuoto che distruggono ogni macchina del tempo nel momento in cui viene creata (capitolo XIV); ha scommesso con Kip Thorne sulla possibilità o meno che Cygnus X-1 sia un buco nero (capitolo VIII) e che nel nostro Universo possano formarsi delle singolarità nude (capitolo XIII).

ISRAEL, WERNER (1931), Fisico teorico canadese, sudafricano di nascita); ha dimostrato che tutti i buchi neri che non ruotano devono essere sferici e ha fornito le prove del fatto che un buco nero perde i suoi «peli» irradiandoli all'esterno (capitolo VII); ha scoperto che l'area della superficie dei buchi neri può solo aumentare, ma non comprese il significato di questa conclusione (capitolo XII); assieme a Poisson e Ori ha dimostrato che le forze di marea che circondano la singolarità diventano più deboli con l'invecchiare del buco (capitolo XIII); ha contribuito a far luce sui primi anni della ricerca sui buchi neri (capitolo III).

KERR, ROY P. (1934-), Matematico neozelandese; ha scoperto la soluzione dell'equazione di campo di Einstein, che descrive un buco nero rotante: la «soluzione Kerr» (capitolo VII).

LANDAU, LEV DAVIDOVIC (1908-1968), Fisico teorico sovietico; premio Nobel; ha trapiantato la fisica teorica dell'Europa occidentale nell'Urss negli anni Trenta (capitoli V e XIII); ha tentato di spiegare il calore delle stelle come conseguenza della cattura del materiale stellare da parte del nucleo di neutroni al centro di una stella, stimolando in tal modo la ricerca di Oppenheimer sulle stelle di neutroni e i buchi neri (capitolo V); è stato imprigionato durante il Grande Terrore staliniano e poi rilasciato in modo che potesse elaborare la teoria della superfluidità (capitolo V); ha contribuito alla ricerca sovietica sugli armamenti nucleari (capitolo VI).

LAPLACE, PIERRE SIMON (1749-1827), Filosofo naturale francese; ha elaborato e diffuso il concetto di una stella scura (buco nero) governata dalle leggi della fisica di Newton (capitoli III e VI).

LORENTZ, HENDRIK ANTOON (1853-1928), Fisico teorico olandese; premio Nobel; ha elaborato elementi fondamentali delle leggi della relatività ristretta, il più importante dei quali è la contrazione e dilatazione temporale di Lorentz-Fitzgerald (capitolo I); amico e sodale di Einstein quando questi stava elaborando le leggi relativistiche geenerali della fisica (capitolo II).

MAXWELL, JAMES CLARK (1831-1879), Fisico teorico inglese; ha elaborato le leggi dell'elettricità e del magnetismo (capitolo I).

MICHELL, JOHN (1724-1793), Filosofo naturale inglese; ha elaborato e diffuso il concetto di stella scura (buco nero) governata dalle leggi della fisica di Newton (capitoli III e VI).

MICHELSON, ALBERT ABRAHAM (1852-1931), Fisico sperimentale americano, tedesco di nascita; premio Nobel; ha inventato le tecniche dell'interferometria (capitolo I); ha usato tali tecniche per scoprire che la velocità della luce è indipendente dalla velocità di un soggetto attraverso l'Universo (capitolo I).

MINKOWSKI, HERMANN (1864-1909), Fisico teorico tedesco; insegnante di Einstein (capitolo I); ha scoperto che lo spazio e il tempo sono unificati nello spaziotempo (capitolo II).

MISNER, CHARLES W. (1932-), Fisico teorico americano; allievo di Wheeler; ha elaborato una descrizione molto efficace basata su un diagramma a incasso del modo in cui una stella in fase di implosione produce un buco nero (capitolo VI); ha creato un'équipe di ricerca che ha contribuito in modo significativo all'«età dell'oro» della ricerca sui buchi neri (capitolo VII); ha scoperto che le onde elettromagnetiche e di altro tipo che si propagano vicino a un buco nero rotante possono estrarne l'energia rotazionale e usarla per amplificare se stesse (capitolo XII); ha scoperto le «oscillazioni frullatore» (*mixmaster*) della marea gravitazionale vicino alle singolarità (capitolo XIII).

NEWTON, ISAAC (1642-1727), Filosofo naturale inglese; ha elaborato i fondamenti delle leggi newtoniane della fisica e del concetto di spazio e tempo come assoluti (capitolo I); ha elaborato le leggi newtoniane della gravità (capitolo II).

NOVIKOV, IGOR DMITRIEVICH (1935-), Fisico teorico e astrofisico sovietico; allievo

di Zel'dovich; assieme a Doroshkevich e Zel'dovich ha elaborato alcune delle prime prove fondamentali del fatto che un buco nero non ha peli (capitolo VII); assieme a Zel'dovich ha proposto un metodo per la ricerca astronomica dei buchi neri nella nostra galassia che alla fine sembra avere avuto successo (capitolo VIII); assieme a Thorne ha elaborato la teoria delle strutture dei dischi di accrezione intorno ai buchi neri (capitolo XII); assieme a Doroshkevich ha previsto che le forze di marea all'interno di un buco nero devono cambiare man mano che il buco invecchia (capitolo XIII); ha effettuato ricerche sulla possibilità o meno che le leggi della fisica consentano le macchine del tempo (capitolo XIV).

OPPENHEIMER, J. ROBERT (1904-1967), Fisico teorico americano; ha trapiantato la fisica teorica dall'Europa occidentale negli Stati Uniti negli anni Trenta (capitolo V); assieme a Serber ha dimostrato che l'affermazione di Landau secondo cui le stelle avrebbero potuto mantenere il loro calore grazie a nuclei di neutroni era falsa, e assieme a Volkoff ha dimostrato l'esistenza di un limite massimo relativamente alla massa delle stelle di neutroni (capitolo V); assieme a Snyder ha dimostrato, con un modello molto semplificato, che quando muoiono le stelle massive devono implodere e creare dei buchi neri e ha spiegato delle caratteristiche fondamentali dell'implosione (capitolo VI); ha diretto il progetto americano della bomba atomica, si è opposto al progetto della bomba all'idrogeno in un primo momento e lo ha sostenuto successivamente, gli venne ritirato il nullaosta di sicurezza (capitolo VI); ha sostenuto una disputa con Wheeler sull'eventualità che l'implosione producesse dei buchi neri (capitolo VI).

PENROSE, ROGER (1931-), Matematico e fisico teorico inglese; protégé di Sciama; ha ipotizzato che i buchi neri perdano i loro peli per irradiazione (capitolo VII); ha scoperto che i buchi neri rotanti immagazzinano enormi quantità di energia nel vortice dello spazio esterno all'orizzonte e che tale energia può essere estratta (capitolo VII); ha elaborato il concetto di orizzonte apparente di un buco nero (capitoli XII e XIII); ha scoperto che l'area della superficie dei buchi neri deve aumentare, ma non ha colto il significato di tale conclusione (capitolo XII); ha inventato e sviluppato metodi globali (topologici) per analizzare i buchi neri (capitolo XIII); ha dimostrato che i buchi neri devono avere una singolarità nel loro nucleo e, assieme a Hawking, ha dimostrato che il Big Bang conteneva una singolarità (capitolo XIII); ha proposto la congettura della censura cosmica, secondo cui le leggi della fisica impediscono alle singolarità nude di firmarsi nel nostro Universo (capitolo XIII).

PRESS, WILLIAM H. (1948-), Fisico teorico e astrofisico americano; allievo di Thorne; assieme a Teukolsky ha dimostrato che i buchi neri sono stabili rispetto alle piccole perturbazioni (capitoli VII e XII); ha scoperto che i buchi neri possono pulsare (capitolo VII); ha organizzato il funerale dell'età dell'oro della ricerca sui buchi neri (capitolo VII).

PRICE, RICHARD H. (1943-), Fisico teorico e astrofisico americano; allievo di Thorne; ha fornito la prova definitiva del fatto che un buco nero perde i peli per

irradiazione e ha dimostrato che qualsiasi cosa possa essere emessa sotto forma di radiazioni verrà emessa completamente (capitolo VII); ha avuto sotto gli occhi la prova della pulsazione dei buchi neri ma non ne ha riconosciuto il significato (capitolo VII); assieme ad altri ha elaborato il paradigma della membrana per i buchi neri (capitolo XI); si è preoccupato per la salute mentale di Thorne quando questi ha cominciato le sue ricerche sulle macchine del tempo (capitolo XIV).

REES, MARTIN (1942-), Astrofisico inglese; allievo di Sciama; ha elaborato modelli che spiegano le caratteristiche osservate dei sistemi binari in cui un buco nero accumula gas da una stella compagna (capitolo VIII); ha proposto l'ipotesi che i lobi giganti di una radiogalassia siano alimentati da fasci di energia che viaggiano attraverso il nucleo della galassia fino ai lobi, e assieme a Blandford ha elaborato modelli particolareggiati di tali fasci (capitolo IX); assieme a Blandford e altri ha elaborato modelli che spiegano come un buco nero supermassivo possa alimentare radiogalassie, quasar e nuclei attivi di galassie (capitolo IX).

SAKHAROV, ANDREI DMITRIEVICH (1921-1989), Fisico teorico sovietico; ha elaborato idee fondamentali che sono alla base della bomba all'idrogeno sovietica; amico intimo, collega e rivale di Zel'dovich (capitoli VI e VII); successivamente divenne la figura di spicco della dissidenza sovietica e, dopo la glasnost, una vera e propria icona.

SCHWARZSCHILD, KARL (1876-1916), Astrofisico tedesco; ha scoperto la soluzione Schwarzschild dell'equazione di campo di Einstein che descrive la geometria dello spaziotempo di una stella non rotante statica o in fase di implosione e ha anche descritto un buco nero non rotante (capitolo III); ha scoperto la soluzione dell'equazione di Einstein relativa all'interno di una stella a densità costante, una soluzione che Einstein utilizzò per sostenere che i buchi neri non possono esistere (capitolo III).

SCIAMA, DENNIS (1926-1999), Astrofisico inglese e mentore di ricercatori inglesi sui buchi neri (capitoli VII e XIII).

TEUKOLSKY, SAUL A. (1947-), Fisico teorico americano, sudafricano di nascita; allievo di Thorne; ha inventato ed elaborato la formalizzazione con cui vengono analizzate le perturbazioni dei buchi neri rotanti e, assieme a Press, l'ha utilizzata per dimostrare che i buchi neri sono stabili rispetto alle piccole perturbazioni (capitoli VII e XII); assieme a Shapiro ha scoperto prove del fatto che le leggi della fisica permettono la formazione di singolarità nude nel nostro Universo (capitolo XIII).

THORNE, KIP (1940-), Fisco teorico americano; allievo di Wheeler; ha proposto la congettura del cerchio che descrive quando i buchi neri possono formarsi in una stella in fase di implosione e ne ha elaborato le prove (capitolo VII); ha effettuato stime delle onde gravitazionali emesse da sorgenti astrofisiche e ha contribuito a elaborare idee e progetti per rilevarle (capitolo X); ha elaborato idee sull'origine statistica dell'entropia di un buco nero (capitolo XII); ha esplorato le leggi della fisica attraverso esperimenti mentali sui cunicoli temporali e le macchine del tempo (capitolo XIV).

WALD, ROBERT M. (1947-), Fisico teorico americano; allievo di Wheeler; ha contribuito alla formalizzazione di Teukolsky per l'analisi delle perturbazioni dei buchi neri e alla sua applicazione (capitolo VII); assieme ad altri ha elaborato una interpretazione del comportamento dei campi elettrici al di fuori di un buco nero, un'interpretazione che sta alla base del paradigma della membrana (capitolo XI); ha contribuito alla teoria dell'evaporazione dei buchi neri e alle sue implicazioni per l'origine dell'entropia dei buchi neri (capitolo XII); assieme a Geroch ha fornito il primo argomento che ipotizza che le macchine del tempo possano distruggersi ogniqualvolta si cerchi di costruirle (capitolo XIV).

WEBER, JOSEPH (1919-2000), Fisico sperimentale americano; ha inventato i primi rilevatori di onde gravitazionali del mondo («rilevatori a sbarre») e ha partecipato all'invenzione dei rilevatori interferometrici di onde gravitazionali (capitolo X); universalmente considerato il «padre» della rilevazione delle onde gravitazionali.

WHEELER, JOHN ARCHIBALD (1911-2008), Fisico teorico americano; mentore di ricercatori americani sui buchi neri e altri aspetti della relatività generale (capitolo VII); assieme a Harrison e Wakano ha elaborato l'equazione di stato per la materia fredda e morta e un intero catalogo di stelle fredde e morte, consolidando in tal modo le prove del fatto che quando le stelle massive muoiono devono formare dei buchi neri (capitolo V); assieme a Niels Bohr ha elaborato la teoria della fissione nucleare (capitolo VI); ha diretto un'équipe che ha progettato le prime bombe all'idrogeno americane (capitolo VI); ha sostenuto in una disputa con Oppenheimer che i buchi neri non possono formarsi, in seguito ha ritrattato la sua tesi ed è diventato il principale sostenitore dell'esistenza dei buchi neri (capitolo VI); ha coniato le espressioni «buco nero» (capitolo VI) e «i buchi neri non hanno peli» (capitolo VII); ha sostenuto che «la questione dello stato finale» delle stelle che implodono per cause gravitazionali è una chiave per comprendere l'unificazione tra la relatività generale e la meccanica quantistica e in questo ambito ha anticipato la scoperta, fatta da Hawking, che i buchi neri possono evaporare (capitoli VI e XIII); ha elaborato i fondamenti delle leggi della gravità quantistica e, cosa più importante, ha concepito e sviluppato il concetto di schiuma quantistica, che attualmente sospettiamo sia il materiale di cui sono fatte le singolarità (capitolo XIII); ha elaborato il concetto di lunghezza e di area di Planck-Wheeler (capitoli XII, XIII e XIV).

ZEL'DOVICH, YAKOV BORISOVICH (1914-1987), Fisico teorico e astrofisico sovietico; mentore di astrofisici sovietici (capitolo VII); ha elaborato la teoria delle reazioni nucleari a catena (capitolo V); ha escogitato idee determinanti che sono alla base della bomba atomica e della bomba all'idrogeno sovietiche e ha diretto un'équipe che ha progettato le bombe (capitolo VI); assieme a Doroshkevich e a Novikov ha fornito le prime prova dell'assenza di peli nei buchi neri (capitolo VII); ha inventato diversi modi di effettuare le ricerche astronomiche dei buchi neri, una delle quali sembra infine avere avuto successo (capitolo VIII); indipendentemente da Salpeter

ha ipotizzato che i buchi neri supermassivi alimentino quasar e radiogalassie (capitolo IX); ha concepito l'idea che le leggi della meccanica quantistica possano essere alla base dell'emissione di radiazioni da parte dei buchi neri rotanti, fenomeno che ne rallenta la rotazione, e assieme a Starobinsky ha dimostrato la validità di tale tesi, tuttavia in seguito ha contrastato la prova fornita da Hawking del fatto che anche i buchi neri non rotanti possono emettere radiazioni ed evaporare (capitolo XII).

ZWICKY, FRITZ (1898-1974), Fisico teorico, astrofisico e astronomo osservativo americano, svizzero di nascita; assieme a Baade ha individuato le supernovae come una classe di oggetti astronomici e ha ipotizzato che esse siano alimentate dall'energia rilasciata quando una stella normale diventa una stella di neutroni (capitolo V).

CRONOLOGIA

Una cronologia di eventi, intuizioni e scoperte

1687	Newton pubblica i *Principia*, in cui sono formulati i suoi concetti di spazio e tempo assoluti, le sue leggi del moto e della gravità [Cap. I]
1783 e 1795	Michell e Laplace, utilizzando le leggi sul moto, sulla gravità e sulla luce di Newton, formulano il concetto di un buco nero newtoniano [Cap. III]
1864	Maxwell formula le leggi unificate dell'elettromagnetismo [Cap. I]
1887	Michelson e Morley dimostrano, sperimentalmente, che la velocità della luce è indipendente dalla velocità della Terra attraverso lo spazio assoluto [Cap. I]
1905	Einstein dimostra che lo spazio e il tempo sono relativi anziché assoluti e formula le leggi della relatività ristretta [Cap. I]
	Einstein dimostra che le onde elettromagnetiche si comportano in alcune circostanze come particelle, inaugurando il concetto di dualismo onda/particella alla base della meccanica quantistica [Cap. IV]
1907	Einstein, muovendo i primi passi verso la relatività generale, formula il concetto di quadro locale inerziale e il principio di equivalenza, e deduce la dilatazione gravitazionale del tempo [Cap. II]

1908	Hermann Minkowski unifica lo spazio e il tempo in uno spaziotempo quadridimensionale assoluto [Cap. II]
1912	Einstein si rende conto che lo spaziotempo è curvo, e che la marea gravitazionale è una manifestazione di tale curvatura [Cap. II]
1915	Einstein e Hilbert formulano indipendentemente l'equazione di campo di Einstein (che descrive in che modo la massa curvi lo spaziotempo) completando le leggi della relatività generale [Cap. II]
1916	Karl Schwarzschild scopre la soluzione Schwarzschild dell'equazione di campo di Einstein, che successivamente risulterà descrivere i buchi neri non rotanti e privi di carica elettrica [Cap. III]
	Flamm scopre che, con una scelta appropriata della topologia, la soluzione di Schwarzschild dell'equazione di Einstein può descrivere un cunicolo temporale [Cap. XIV]
1916 e 1918	Reissner e Norsdtröm scoprono la loro soluzione dell'equazione di campo di Einstein, che successivamente descriverà i buchi neri non rotanti dotati di carica elettrica [Cap. VII]
1926	Eddington richiama l'attenzione sul mistero delle nane bianche e si oppone all'esistenza dei buchi neri [Cap. IV]
	Schrödinger e Heisenberg, basandosi su ricerche altrui, completano la formulazione delle leggi della meccanica quantistica [Cap. IV]
	Fowler usa le leggi della meccanica quantistica per dimostrare come la degenerazione degli elettroni risolva il mistero delle nane bianche [Cap. IV]
1930	Chandrasekhar scopre l'esistenza di un limite massimo relativamente alla massa delle nane bianche [Cap. IV]
1932	Chadwick scopre il neutrone [Cap. V]
	Jansky scopre le onde radio cosmiche [Cap. IX]

1933	Landau costituisce la sua équipe di ricerca in Urss, dove inizia a introdurre la fisica teorica dell'Europa occidentale [Cap. V e XIII]
	Baade e Zwicky individuano le supernovae, propongono il concetto di stella di neutroni e ipotizzano che le supernovae siano alimentate dall'implosione di un nucleo stellare che dà luogo a una stella di neutroni [Cap. V]
1935	Chandrasekhar perfeziona la dimostrazione dell'esistenza di una massa massima per le nane bianche e Eddington ne attacca l'opera [Cap. IV]
1935-1939	Il Grande Terrore in Urss [Cap. V e VI]
1937	Greenstein e Whipple dimostrano che le onde radio cosmiche di Jansky non possono essere spiegate dai processi astrofisici noti all'epoca [Cap. IX]
	Landau, in un disperato tentativo di evitare la prigione e la morte, ipotizza che le stelle siano mantenute calde dall'energia rilasciata quando la materia fluisce nei nuclei di neutroni presenti al centro di esse [Cap. V]
1938	Landau viene imprigionato a Mosca con l'accusa di spionaggio a favore della Germania [Cap. V]
	Oppenheimer e Serber dimostrano l'invalidità del metodo di Landau, basato sui nuclei di neutroni, per mantenere calde le stelle; Oppenheimer e Volkoff dimostrano l'esistenza di un limite massimo per la massa delle stelle di neutroni [Cap. V]
	Bethe e Critchfield dimostrano che il Sole e altre stelle mantengono il loro calore bruciando combustibile nucleare [Cap. V]
1939	Landau, in fin di vita, viene rilasciato dal carcere
	Einstein afferma che i buchi neri non possono esistere nell'Universo reale [Cap. IV]
	Oppenheimer e Snyder, con un calcolo molto semplificato, di-

mostrano che una stella che implode forma un buco nero e (paradossalmente) che l'implosione sembra congelarsi all'altezza dell'orizzonte se è vista dall'esterno, ma non se è vista dalla superficie della stella [Cap. VI]

Reber scopre onde radio cosmiche provenienti da galassie distanti, ma non capisce cos'è quello che sta osservando [Cap. IX]

Bohr e Wheeler elaborano la teoria della fissione nucleare [Cap. VI]

Khariton e Zel'dovich elaborano la teoria della reazione a catena delle fissioni nucleari [Cap. VI]

L'esercito tedesco invade la Polonia scatenando la Seconda Guerra Mondiale

1942 Gli Stati Uniti lanciano un programma d'urgenza per costruire la bomba atomica, diretto da Oppenheimer [Cap. VI]

1943 L'Urss lancia un programma di bassa intensità per progettare reattori nucleari e bombe atomiche con Zel'dovich come teorico principale [Cap. VI]

1945 Gli Stati Uniti lanciano bombe atomiche su Hiroshima e Nagasaki, finisce la Seconda Guerra Mondiale. Viene avviato un programma a bassa intensità per la realizzazione di una superbomba [Cap. VI]

L'Urss lancia un programma d'urgenza per costruire la bomba atomica con Zel'dovich come teorico principale [Cap. VI]

1946 Freedman e la sua équipe lanciano il primo strumento astronomico al di sopra dell'atmosfera terrestre utilizzando un razzo V-2 catturato ai tedeschi [Cap. VIII]

In Inghilterra e in Australia fisici sperimentali cominciano a costruire radiotelescopi e radiointerferometri

1948 In Unione Sovietica Zel'dovich, Sakharov, Ginzburg e altri iniziano a progettare una superbomba (bomba all'idrogeno);

Ginzburg inventa il combustibile LiD, Sakharov il progetto fatto come una torta a strati [Cap. VI]

1949 — L'Urss fa esplodere le prime bombe atomiche accendendo il dibattito negli Stati Uniti su un programma d'urgenza per costruire la superbomba. L'Urss inizia direttamente un programma d'urgenza per costruire la superbomba, senza dibattito [Cap. VI]

1950 — Gli Usa lanciano un programma d'urgenza per costruire la superbomba [Cap. VI]

Kiepenheuer e Ginzburg si rendono conto che le onde radio cosmiche sono prodotte dagli elettroni che emettono raggi cosmici girando a spirale nei campi magnetici interstellari [Cap. IX]

Alexandrov e Pimenov tentano inutilmente di introdurre gli strumenti topologici negli studi matematici sullo spaziotempo curvo [Cap. XIII]

1951 — Teller e Ulam negli Stati Uniti creano il concetto di superbomba «autentica», di potenza arbitrariamente infinita; Wheeler mette insieme un'équipe per progettare una bomba basata su questa idea e simularne l'esplosione al computer [Cap. VI]

Graham Smith fornisce a Baade un campo di errore di un arcominuto per la radiosorgente cosmica Cyg A e Baade con un telescopio ottico scopre che Cyg A è una galassia distante, una «radiogalassia» [Cap. IX]

1952 — Gli Stati Uniti fanno esplodere la prima superbomba, un ordigno troppo pesante per essere trasportato da un velivolo o da un razzo, utilizzando l'invenzione di Teller-Ulam e il lavoro di progettazione dell'équipe di Wheeler [Cap. VI]

1953 — Wheeler si dedica alla ricerca nel campo della relatività generale

Jennison e Das Gupta scoprono che le onde radio provenienti dalle galassie sono prodotte da due lobi giganti ubicati ai lati opposti della galassia [Cap. IX]

Muore Stalin [Cap. IX]

L'Urss fa esplodere la prima bomba all'idrogeno basata sulle idee di Ginzburg e Sakharov. Gli scienziati Usa affermano che non si tratta di una superbomba «autentica» perché il progetto non consente alla bomba di essere arbitrariamente potente [Cap. VI]

1954 — Sakharov e Zel'dovich inventano l'idea Teller-Ulam per un'«autentica» superbomba [Cap. VI]

Gli Stati Uniti fanno esplodere la prima superbomba autentica basata sull'idea Teller-Ulam/Sakharov-Zel'dovich [Cap. VI]

Teller testimonia contro Oppenheimer, cui viene revocato il nullaosta di sicurezza [Cap. VI]

1955 — L'Urss fa esplodere la prima superbomba autentica basata sull'idea Teller-Ulam/Sakharov-Zel'dovich [Cap. VI]

Wheeler formula il concetto di fluttuazioni gravitazionali del vuoto, individua la lunghezza di Planck-Wheeler come la scala alla quale esse diventano enormi e ipotizza che su tale scala il concetto di spaziotempo venga sostituito da una schiuma quantistica [Cap. XII, XIII, XIV]

1957 — Wheeler, Harrison e Wakano formulano il concetto di materia fredda e morta e redigono un catalogo di tutte le possibili stelle fredde e morte. Il loro catalogo rafforza la conclusione secondo cui le stelle massive devono implodere quando muoiono [Cap. V]

L'équipe di Wheeler studia i cunicoli temporali; Regge e Wheeler inventano i metodi perturbativi per analizzare le piccole perturbazioni dei cunicoli temporali; la loro formalizzazione sarà utilizzata in seguito per studiare le perturbazioni dei buchi neri [Cap. VII, XIV]

Wheeler pone la questione dello stato finale dell'implosione stellare come Santo Graal della ricerca e, in un confronto con Oppenheimer, si oppone all'idea che lo stato finale sia nascosto dentro un buco nero [Cap. VI, XIII]

1958 — Finkelstein scopre un nuovo quadro di riferimento per la geometria di Shwarzschild e risolve il paradosso di Oppenheimer-Snyder risalente al 1939, riguardo al perché una stella che implode si congeli una volta raggiunta la circonferenza critica, se vista dall'esterno, ma continui a implodere oltre tale circonferenza, se vista dall'interno [Cap. VI]

1958-1960 — Wheeler accetta gradualmente il concetto di buco nero e ne diviene uno dei principali sostenitori [Cap. VI]

1959 — Wheeler sostiene che le singolarità dello spaziotempo che si formano nel «big crunch» o dentro un buco nero sono governate dalle leggi della gravità quantistica e possono consistere in schiuma quantistica [Cap. XIII]

Burbidge dimostra che i lobi giganti delle radiogalassie contengono energia magnetica e cinetica equivalente a quella dalla conversione perfetta di 10 milioni di Soli in energia pura [Cap. IX]

1960 — Weber inizia la costruzione di rilevatori a sbarre per le onde gravitazionali [Cap. X]

Kruskal dimostra che se non vi viene immesso nessun tipo di materiale un cunicolo temporale sferico svanirà talmente in fretta che non sarà possibile attraversarlo [Cap. XIV]

Graves e Brill scoprono che la soluzione Reissner-Nordström dell'equazione di Einstein descrive un buco nero sferico e dotato di carica elettrica, e anche un cunicolo temporale [Cap. VII]. Ipotizzano (erroneamente) che sia possibile viaggiare dall'interno di un buco nero presente nel nostro Universo attraversando l'iperspazio ed entrando in un qualche altro universo [Cap. XIII]

1961 — Khalatnikov e Lifshitz affermano (erroneamente) che l'equazione di campo di Einstein non permette l'esistenza di singolarità con una curvatura deformata in modo casuale e che pertanto le singolarità non possono formarsi all'interno di buchi neri reali o nel «big crunch» dell'Universo [Cap. XIII]

1961-1962 — Zel'dovich inizia a effettuare ricerche sull'astrofisica e la relati-

vità generale, recluta Novikov e comincia a costituire la sua équipe di ricerca [Cap. VI]

1962 — Thorne comincia a effettuare ricerche sotto la guida di Wheeler e inizia quelle che porteranno alla congettura del cerchio [Cap. VII]

Giacconi e la sua équipe scoprono i raggi X cosmici usando un contatore Geiger lanciato fuori dell'atmosfera terrestre con un razzo Aerobee [Cap. VIII]

1963 — Kerr scopre la sua soluzione dell'equazione di campo di Einstein [Cap. VII]

Schmidt, Greenstein e Sandage scoprono i quasar [Cap. IX]

1964 — Inizia l'età dell'oro della ricerca teorica sui buchi neri [Cap. VII]

Penrose introduce la topologia come strumento nella ricerca sulla relatività e la usa per dimostrare che le singolarità devono risiedere all'interno dei buchi neri [Cap. XIII]

Ginzburg e poi Doroshkevich, Novikov e Zel'dovich scoprono la prima prova del fatto che un buco nero non ha «peli» [Cap. VII]

Colgate, May e White negli Stati Uniti, e Podurets, Imshennik e Nadezhin nell'Urss adattano i codici informatici della progettazione delle bombe per simulare implosioni reali dei nuclei stellari; essi confermano le ipotesi di Zwicky del 1934 secondo cui le implosioni di masse non elevate formano stelle di neutroni e innescheranno una supernova, e confermano la conclusione di Oppenheimer-Snyder secondo cui l'implosione di masse più grandi dà luogo a un buco nero [Cap. VI]

Zel'dovich, Guseinov e Salpeter presentano le prime proposte su come cercare i buchi neri nel nostro Universo reale [Cap. VIII]

Salpeter e Zel'dovich ipotizzano (correttamente) che i buchi neri supermassivi alimentino i quasar e le radiogalassie [Cap. IX]

	Herbert Friedman e la sua équipe scoprono Cygnus X-1 usando un contatore Geiger lanciato con un razzo [Cap. VIII]
1965	Boyer e Lindquist, Carter e Penrose scoprono che la soluzione di Kerr dell'equazione di campo di Einstein descrive un buco nero rotante [Cap. VII]
1966	Zel'dovich e Novikov propongono di cercare i buchi neri nei sistemi binari in cui un oggetto emette raggi X e l'altro luce; questo metodo avrà (probabilmente) successo negli anni Settanta [Cap. VIII]
	Geroch dimostra che la topologia dello spazio può cambiare (ad esempio, un cunicolo temporale può formarsi) in modo non meccanico-quantistico solo se nel processo viene creata, almeno temporaneamente, una macchina del tempo [Cap. XIV]
1967	Wheeler conia l'espressione *buco nero* [Cap. VII]
	Israel dimostra rigorosamente il primo elemento della congettura dei buchi neri senza peli: un buco non rotante deve essere perfettamente sferico [Cap. VII]
1968	Penrose sostiene che è impossibile viaggiare dall'interno di un buco nero ubicato nel nostro Universo attraverso lo spaziotempo ed entrare in qualche altro universo; altri, negli anni Settanta, confermeranno la correttezza della sua tesi [Cap. XIII]
	Carter scopre la natura del vortice dello spazio attorno a un buco nero rotante e la sua influenza sulle particelle che vi precipitano dentro [Cap. VII]
	Misner e indipendentemente Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz scoprono la singolarità oscillatoria «frullatore» (*mixmaster*) come soluzione dell'equazione di Einstein [Cap. XIII]
1969	Hawking e Penrose dimostrano che il nostro Universo deve avere una singolarità all'inizio della sua espansione nel Big Bang [Cap. XIII]
	Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz scoprono la singolarità oscillan-

te BKL come soluzione dell'equazione di Einstein; dimostrano che essa presenta deformazioni casuali della curvatura dello spaziotempo e sostengono che pertanto è il tipo di singolarità che si forma dentro i buchi neri e nel «big crunch» [Cap. XIII]

Penrose scopre che un buco nero rotante immagazzina un'enormità di energia nel movimento vorticoso dello spazio attorno a sé e che questa energia rotazionale può essere estratta [Cap. VII]

Penrose propone la sua congettura della censura cosmica, secondo cui le leggi della fisica impediscono la formazione di singolarità nude [Cap. XIII]

Lynden-Bell avanza l'ipotesi che i buchi neri giganti si trovino nei nuclei delle galassie e siano circondati da dischi di accrezione [Cap. IX]

Christodoulou nota una somiglianza tra l'evoluzione di un buco nero che accumula lentamente la sua materia e le leggi della termodinamica [Cap. XII]

Weber annuncia incerte prove sperimentali dell'esistenza delle onde gravitazionali, spingendo molti altri sperimentatori a cominciare a costruire rilevatori a sbarre. Nel 1975 diventerà chiaro che quel che vedeva non erano onde [Cap. X]

Braginsky scopre prove dell'esistenza di un limite quantistico alla sensibilità dei rilevatori di onde gravitazionali [Cap. X]

1970

Bardeen dimostra che l'accumulo di gas probabilmente fa ruotare molto velocemente i buchi neri del nostro Universo [Cap. IX]

Price, avvalendosi dei lavori di Penrose, Novikov e Chase, de la Cruz e Israel, dimostra che i buchi neri perdono i loro peli emettendoli come radiazioni, e che tutto ciò che può essere irradiato lo sarà completamente [Cap. VII]

Hawking formula il concetto di orizzonte assoluto di un buco nero e dimostra che l'area della superficie degli orizzonti assoluti aumenta sempre [Cap. XII]

L'équipe di Giacconi costruisce Uhuru, il primo rilevatore di raggi X installato su un satellite, che viene lanciato in orbita [Cap. VIII]

1971 Lo studio combinato dei raggi X, delle onde radio e delle osservazioni ottiche comincia a fornire consistenti prove del fatto che Cygnus X-1 sia un buco nero che orbita attorno a una stella normale [Cap. VIII]

Weiss al MIT e Forward a Hughes aprono la strada ai rilevatori interferometrici di onde gravitazionali [Cap. X]

Rees ipotizza che i lobi giganti di una radiogalassia siano alimentati da getti che scaturiscono dal nucleo della galassia [Cap. IX]

Hanni e Ruffini formulano il concetto di carica di superficie su un orizzonte, uno dei fondamenti del paradigma della membrana [Cap. XI]

Press scopre che i buchi neri possono pulsare [Cap. VII]

Zel'dovich ipotizza che i buchi neri rotanti emettano radiazioni, e Zel'dovich e Starobinsky usano le leggi quantistiche dei campi nello spaziotempo curvo per giustificare l'ipotesi di Zel'dovich [Cap. XII]

Hawking segnala che dei minuscoli buchi neri «primordiali» potrebbero essere stati creati nel Big Bang [Cap. XII]

1972 Carter, sulla base dei lavori di Hawking e Israel, dimostra la congettura secondo cui i buchi neri rotanti e privi di carica elettrica non hanno peli (eccetto per qualche dettaglio tecnico aggiunto in seguito da Robinson). Egli dimostra che un buco nero del genere è sempre descritto dalla soluzione di Kerr dell'equazione di Einstein [Cap. VII]

Thorne propone la congettura del cerchio come criterio per la formazione dei buchi neri [Cap. VII]

Bekenstein ipotizza che l'area della superficie di un buco nero

sia la sua entropia sotto mentite spoglie, e che corrisponda al logaritmo del numero di modi in cui il buco potrebbe essersi formato. Hawking si oppone energicamente a questa congettura [Cap. XII]

Bardeen, Carter e Hawking enunciano le leggi dell'evoluzione dei buchi neri in una forma identica alle leggi della termodinamica, ma affermano che l'area della superficie dell'orizzonte non può essere la sua entropia sotto mentite spoglie [Cap. XII]

Teukolsky elabora i metodi perturbativi per descrivere le pulsazioni dei buchi neri rotanti [Cap. VII]

1973 — Press e Teukolsky dimostrano che le pulsazioni di un buco nero rotante sono stabili; non si accrescono sfruttando l'energia rotazionale del buco [Cap. VII]

1974 — Hawking dimostra che *tutti* i buchi neri, rotanti o meno, emettono radiazioni esattamente come se avessero una temperatura proporzionale alla loro gravità superficiale, e che in tal modo evaporano. Egli poi ritratta la sua tesi secondo cui le leggi della meccanica dei buchi neri non sono le leggi della termodinamica sotto mentite spoglie e ritratta la critica alla congettura di Bekenstein secondo cui l'area della superficie di un buco nero è la sua entropia camuffata [Cap. XII]

1974-1978 — Blandford, Rees e Lynden-Bell individuano diversi modi in cui i buchi neri supermassivi nei nuclei delle galassie e nei quasar possono creare getti [Cap. IX]

1975 — Bardeen e Petterson dimostrano che il vortice dello spazio attorno a un buco nero rotante può funzionare come un giroscopio per mantenere la direzione dei getti [Cap. IX]

Chandrasekhar si lancia in una ricerca quinquennale per elaborare una descrizione matematica completa delle perturbazioni dei buchi neri [Cap. VII]

Unruh e Davies deducono che, dal punto di vista di osservatori accelerati che si trovino appena al di sopra dell'orizzonte del buco nero, il buco è circondato da un'atmosfera calda di parti-

celle, la cui graduale fuoriuscita spiega l'evaporazione del buco [Cap. XII]

Page calcola lo spettro di particelle irradiate dai buchi neri. Hawking e Page deducono dai dati osservativi sui raggi gamma cosmici che non possono esservi più di 300 minuscoli, primordiali buchi neri che evaporano in ogni anno luce cubo di spazio [Cap. XII]

I giovani ricercatori dichiarano finita l'età dell'oro della ricerca teorica sui buchi neri [Cap. VII]

1977 Gibbons e Hawking verificano la congettura di Bekenstein secondo cui l'entropia di un buco nero è il logaritmo del numero di modi in cui può essersi formato [Cap. VII]

Radioastronomi usano gli interferometri per scoprire i getti che, dal motore costituito dai buchi neri al centro delle galassie, forniscono energia ai lobi giganti che emettono onde radio [Cap. IX]

Blandford e Znajek dimostrano che i campi magnetici che attraversano l'orizzonte di un buco nero rotante possono estrarne l'energia rotazionale, che a sua volta può alimentare quasar e radiogalassie [Cap. IX]

Znajek e Damour formulano la descrizione come membrana dell'orizzonte di un buco nero [Cap. XI]

Braginsky e i suoi colleghi, Caves, Thorne e i loro colleghi escogitano dei sensori quantistici senza demolizione per ovviare al limite quantistico relativo ai rilevatori a sbarre di onde gravitazionali [Cap. X]

1978 L'équipe di Giacconi completa la costruzione del primo telescopio a raggi X ad alta risoluzione, battezzato «Einstein», che viene lanciato in orbita [Cap. VIII]

1979 Townes e altri scoprono prove dell'esistenza di un buco nero di 3 milioni di masse solari al centro della nostra galassia [Cap. IX]

	Drever avvia presso il Caltech un progetto di rilevamento delle onde gravitazionali basato sugli interferometri [Cap. X]
1982	Bunting e Mazur dimostrano la congettura dell'assenza di peli per i buchi neri rotanti e dotati di carica elettrica [Cap. VII]
1983-1988	Phinney e altri elaborano modelli esaurienti basati sui buchi neri per spiegare tutti i particolari dei quasar e delle radiogalassie [Cap. IX]
1984	La National Science Foundation attua un'unione forzata delle attività di rilevamento delle onde gravitazionali del Caltech e del MIT dando origine al progetto LIGO [Cap. X]
	Redmount (basandosi sui precedenti lavori di Eardley) dimostra che la radiazione che penetra in un cunicolo temporale sferico e vuoto viene accelerata e dotata di elevata energia, e a sua volta accelera di molto la distruzione del cunicolo [Cap. XIV]
1985-1993	Thorne, Morris, Yurtsever, Friedman, Novikov e altri esplorano le leggi della fisica domandandosi se permettano l'esistenza di cunicoli temporali attraversabili e di macchine del tempo [Cap. XIV]
1987	Vogt diventa il direttore del progetto LIGO, che da quel momento comincia a progredire vigorosamente [Cap. X]
1990	Kim e Thorne dimostrano che, ogniqualvolta si cerchi di costruire una macchina del tempo, con qualsiasi mezzo, un intenso fascio di fluttuazioni del vuoto circola attraverso la macchina nel momento in cui viene creata per la prima volta [Cap. XIV]
1991	Hawking elabora la congettura della protezione della cronologia (secondo cui le leggi della fisica proibiscono le macchine del tempo) e sostiene che venga messa in atto dal fascio circolante di fluttuazioni del vuoto che distruggono tutte le macchine del tempo nel momento in cui vengono create per la prima volta [Cap. XIV]
	Israel, Poisson e Ori, basandosi su precedenti lavori di Doroshkevich e Novikov, dimostrano che la singolarità all'interno di

un buco nero invecchia; Ori dimostra che, quando il buco è vecchio e in stato di quiete, gli oggetti che vi cadono dentro non vengono fortemente deformati dalle maree gravitazionali della singolarità fino al momento in cui non entrano in contatto con il nucleo governato dalla gravità quantistica [Cap. XIII]

Shapiro e Teukolsky scoprono prove, nelle simulazioni ai supercomputer, del fatto che la congettura della censura potrebbe rivelarsi sbagliata: delle singolarità nude potrebbero formarsi a piacimento quando delle stelle estremamente non sferiche implodono [Cap. XIII]

1993 Hulse e Taylor ricevono il premio Nobel per aver dimostrato, attraverso le misurazioni di una pulsar binaria, che le onde gravitazionali esistono [Cap. X]

GLOSSARIO

Definizioni dei termini esotici

ACCELERATO, OSSERVATORE, Un osservatore che non è in caduta libera.

ACCREZIONE, DISCO DI, Un disco di gas che circonda un buco nero o una stella di neutroni. L'attrito nel disco fa assumere gradualmente al gas un movimento a spirale verso l'interno portandolo ad accumularsi nel buco o nella stella.

ADIABATICO, INDICE, Lo stesso che RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE.

ANGOLARE, MOMENTO, Una misura della quantità di rotazione posseduta da un corpo. In questo libro il termine «rotazione» (spin) è spesso usato al posto di «momento angolare».

ANTIMATERIA, Una forma di materia che costituisce l'«anatema» per la materia comune. A ogni tipo di particella comune (ad esempio un elettrone, un protone o un neutrone) corrisponde una quasi identica antiparticella di antimateria (il positrone, l'antiprotone o l'antineutrone). Quando una particella di materia incontra la corrispondente antiparticella di antimateria esse si annichiliscono reciprocamente.

ASSOLUTO, Indipendente dal quadro di riferimento dei diversi soggetti; identico in qualsiasi quadro di riferimento venga misurato.

ASSOLUTO, ORIZZONTE, La superficie di un buco nero. Si veda ORIZZONTE.

ASSOLUTO, SPAZIO, Il concetto di Newton dello spazio tridimensionale nel quale viviamo caratterizzato dalla nozione di quiete assoluta e dalla caratteristica per cui la lunghezza degli oggetti è indipendente dal moto del quadro di riferimento in cui viene misurata.

ASSOLUTO, TEMPO, Il concetto di Newton del tempo come universale, con un'unica e universalmente condivisa nozione di intervallo temporale tra due eventi.

ASTROFISICA, Il ramo della fisica che si occupa degli oggetti cosmici e delle leggi della fisica che li governano.

ASTROFISICO, Un fisico (di solito teorico) specializzato nell'uso delle leggi della fisica per cercare di comprendere il comportamento degli oggetti cosmici.

ASTRONOMO, Uno scienziato specializzato nell'osservazione di oggetti cosmici mediante telescopi.

ASTRONOMO OTTICO, Un astronomo che osserva l'Universo utilizzando la luce visibile (la luce che può essere vista dall'occhio umano).

ATOMICA, BOMBA, Una bomba la cui energia esplosiva deriva da una reazione a catena di fissioni di nuclei di uranio-235 o di plutonio-239.

ATOMICA, BOMBA POTENZIATA, Una bomba atomica la cui potenza esplosiva viene rafforzata da uno o più strati di combustibile di fusione.

ATOMO, L'elemento costitutivo della materia. Ogni atomo consiste di un nucleo dotato di carica elettrica positiva e di una nube di elettroni dotati di carica negativa che lo circonda. Le forze elettriche legano la nube di elettroni al nucleo.

BANDA, Una gamma di frequenze.

BANDA, LARGHEZZA DELLA, La gamma di frequenze sulle quali uno strumento può rilevare un'onda.

BIG BANG, L'esplosione dalla quale è nato l'Universo.

BIG CRUNCH, Lo stadio finale in cui collasserà di nuovo l'Universo (supponendo che esso collassi di nuovo; non sappiamo se lo farà o meno).

BINARIO, SISTEMA, Due oggetti in orbita l'uno intorno all'altro; possono essere stelle o buchi neri, o una stella e un buco nero.

BLANDFORD-ZNAJEK, PROCESSO DI, L'estrazione di energia rotazionale da un buco nero rotante mediante campi magnetici che lo attraversano.

BOCCA, L'entrata di un cunicolo temporale. Vi è una bocca a ognuna delle due estremità del cunicolo.

BUCO NERO, Un oggetto (creato dall'implosione di una stella) dentro il quale le cose possono cadere, ma dal quale nulla può fuoriuscire.

BUCO NERO BINARIO, Un sistema binario costituito da due buchi neri.

BUCO NERO GIGANTE, Un buco nero che pesa un milione di volte più del Sole, o ancora di più. Si ritiene che buchi neri del genere si trovino al centro delle galassie e dei quasar.

BUCO NERO PRIMORDIALE, Un buco nero di massa tipicamente molto inferiore a quella del Sole, creatosi nel Big Bang.

CAMPI NELLO SPAZIOTEMPO CURVO, TEORIA QUANTISTICA DEI, Un'unione parziale della relatività generale (spaziotempo curvo) e delle leggi dei campi quantistici in cui onde gravitazionali e campi non gravitazionali sono considerati soggetti alle leggi della meccanica quantistica, mentre lo spaziotempo curvo in cui risiedono viene considerato soggetto alle leggi classiche della fisica.

CAMPO, Qualcosa che è distribuita in modo continuo e omogeneo nello spazio. Esempi ne sono il campo elettrico, il campo magnetico, la curvatura dello spaziotempo e un'onda gravitazionale.

CAMPO QUANTISTICO, Un campo governato dalle leggi della meccanica quantistica. Tutti i campi, se misurati con sufficiente precisione, risultano essere quantistici; ma se misurati con precisione modesta possono comportarsi in modo classico (ossia non mostrano il dualismo onda/particella o fluttuazioni del vuoto).

CHANDRASEKHAR, LIMITE DI, La massa massima che può avere una nana bianca.

CLASSICO, Soggetto alle leggi delle fisica che governano gli oggetti macroscopici; non meccanico-quantistico.

CONGETTURA DELL'ASSENZA DI PELI. La congettura formulata negli anni Sessanta e Settanta (la cui validità è stata dimostrata negli anni Settanta e Ottanta) secondo cui tutte le proprietà di un buco nero sono determinate unicamente dalla massa, dalla carica elettrica e dalla rotazione.

CONGETTURA DEL CERCHIO, La congettura secondo cui un buco nero si forma quando e solo quando un corpo viene compresso fino a essere reso così piccolo che è possibile collocargli attorno un cerchio delle dimensioni della sua circonferenza critica e ruotarlo in ogni direzione.

CONGETTURA DELLA CENSURA COSMICA, La congettura secondo cui le leggi della fisica impediscono che si formino delle singolarità nude quando un oggetto implode.

CONGETTURA DELLA PROTEZIONE DELLA CRONOLOGIA, La congettura di Hawking secondo cui le leggi della fisica non ammettono le macchine del tempo.

CONSERVAZIONE, LEGGE DI, Qualsiasi legge della fisica che indichi una quantità specifica che non può mai cambiare. Esempi sono la conservazione della massa e dell'energia (prese assieme come una singola entità secondo la formula di Einstein $E = Mc^2$), la conservazione della carica elettrica totale, e la conservazione del momento angolare (la quantità totale di rotazione).

CONTATORE GEIGER, Un semplice strumento per la rilevazione dei raggi X, anche detto «contatore proporzionale».

CORPUSCOLO, Il nome usato per una particella di luce nel XVII e nel XVIII secolo.

COSMICA, STRINGA, Un ipotetico oggetto unidimensionale simile a una stringa prodotto da una deformazione dello spazio. La stringa non ha estremità (è chiusa su se stessa come una camera d'aria o si estende sempre, in continuazione).

COSMICO, RAGGIO, Una particella di materia o antimateria che bombarda la Terra dallo spazio. Alcuni raggi cosmici sono prodotti dal Sole, ma la maggior parte viene creata in regioni distanti della Via Lattea, forse in nubi di gas caldo emesse nello spazio interstellare dalle supernovae.

CRITICA, CIRCONFERENZA, La circonferenza dell'orizzonte di un buco nero; la circonferenza entro la quale un oggetto deve contrarsi per creare un buco nero attorno a se stesso. Il valore della circonferenza critica è di 18,5 chilometri per la massa del buco od oggetto espressa in unità di masse solari.

CUNICOLO TEMPORALE, Una «maniglia» nella topologia dello spazio che collega due luoghi del nostro Universo separati da una grande distanza.

CURVATURA DELLO SPAZIO, O SPAZIOTEMPO, La proprietà dello spazio o dello spaziotempo che lo porta a violare i concetti di geometria di Euclide o Minkowsky, ossia la proprietà che consente a linee rette inizialmente parallele di incrociarsi.

CYG A, Cygnus A; radiogalassia che appare (ma appare soltanto) come due galassie in collisione. La prima radiogalassia a essere stata individuata con certezza.

CYG X-1, Cygnus X-1. Un oggetto massivo nella nostra galassia che probabilmente è un buco nero. Il gas caldo che cade verso l'oggetto emette raggi X osservati sulla Terra.

DEUTERIO, NUCLEI DI, O DEUTERONI, Nuclei atomici costituiti da un singolo protone e da un singolo neutrone tenuti insieme dalla forza nucleare. Anche detti «idrogeno pesante» perché gli atomi di deuterio hanno quasi le stesse proprietà chimiche dell'idrogeno.

DIAGRAMMA A INCASSO, Un diagramma in cui si visualizza la curvatura di una superficie bidimensionale incassandola in uno spazio piatto tridimensionale.

DIAGRAMMA SPAZIOTEMPORALE, Un diagramma in cui il tempo è indicato verticalmente e lo spazio orizzontalmente.

DILATAZIONE DEL TEMPO, Un rallentamento del corso del tempo.

DISCREPANZA DELLA SIMULTANEITÀ, Il fatto che eventi che sono simultanei se misurati in un quadro di riferimento non lo sono se misurati in un altro quadro che si muove relativamente al primo.

DOPPLER, SPOSTAMENTO, Lo spostamento di un'onda su una frequenza maggiore (minore lunghezza d'onda, maggiore energia) quando la sua sorgente si muove avvicinandosi a un ricevitore, e su una frequenza minore (maggiore lunghezza d'onda, minore energia) quando la sorgente si allontana dal ricevitore.

DUALISMO ONDA/PARTICELLA, Il fenomeno per cui tutte le onde a volte si comportano come particelle e tutte le particelle a volte si comportano come onde.

ELEMENTARE, PARTICELLA, Una particella subatomica di materia o antimateria. Tra le particelle elementari figurano elettroni, protoni, neutroni, positroni , antiprotoni e antineutroni.

ELETTRICA, CARICA, La proprietà grazie alla quale una particella di materia produce e avverte le forze elettriche.

ELETTRICO, CAMPO, Il campo di forza attorno a una carica elettrica, che attira e respinge altre cariche elettriche.

ELETTRICO, CAMPO LINEE DEL, Linee che puntano in direzione della forza che un campo elettrico esercita sulle particelle cariche. Il corrispettivo elettrico delle linee del campo magnetico.

ELETTROMAGNETICHE, ONDE, Onde di forze elettriche e magnetiche. Esse comprendono, a seconda della lunghezza d'onda, le onde radio, le microonde, la radiazione infrarossa, la luce, la radiazione ultravioletta, i raggi X e i raggi gamma.

ELETTRONE, Una particella fondamentale della materia, dotata di carica elettrica negativa che popola le regioni esterne dell'atomo.

ELETTRONI, DEGENERAZIONE DEGLI, Il comportamento degli elettroni alle alte densità, in cui si muovono erraticamente a velocità elevata in conseguenza del dualismo meccanico-quantistico onda/particella.

ENERGIA ROTAZIONALE, L'energia associata alla rotazione di un buco nero, di una stella o di qualche altro oggetto.

ENTROPIA, Una misura della quantità di aleatorietà presente nei grandi assembramenti di atomi, molecole e altre particelle; corrisponde al logaritmo del numero di volte in cui le particelle potrebbero essere distribuite senza modificarne l'aspetto macroscopico.

EQUAZIONE DIFFERENZIALE, Un'equazione che combina in un'unica formula varie funzioni e i loro tassi di cambiamento; ossia, le funzioni e le loro «derivate». Per «risolvere un'equazione differenziale» si intende «calcolare le funzioni stesse dell'equazione differenziale».

EQUAZIONE DI STATO, Il modo in cui la pressione della materia (o la resistenza della materia alla compressione) dipende dalla sua densità.

ERRORE, CAMPO DI, La regione del cielo in cui le osservazioni suggeriscono che si trovi una stella specifica o un altro oggetto. È detto campo di errore perché maggiori sono le incertezze (gli errori) delle osservazioni, più ampia risulta tale regione.

ESOTICO, MATERIALE, Materiale dotato di una densità media di energia negativa, se misurata da un soggetto che si muova attraverso di esso a una velocità prossima a quella della luce.

ETERE, L'ipotetico mezzo che (secondo il pensiero del XIX secolo) oscilla quando è attraversato dalle onde magnetiche e che, con le sue oscillazioni rende possibili le onde. Si riteneva che l'etere fosse in stato di quiete nello spazio assoluto.

EVENTO, Un punto nello spaziotempo, ossia un'ubicazione nello spazio in uno specifico istante di tempo. Oppure qualcosa che avviene in un punto dello spaziotempo, ad esempio l'esplosione di un petardo.

FILOSOFO NATURALE, Espressione ampiamente usata nei secoli XVII, XVIII, e XIX per descrivere quello che oggi chiamiamo scienziato.

FASCIO, SEPARATORE DI, Strumento utilizzato per separare un fascio luminoso in due parti che vadano in due direzioni diverse e combinare insieme due fasci luminosi provenienti da direzioni diverse.

FISSIONE NUCLEARE, La rottura di un nucleo atomico di grandi dimensioni per formarne molti più piccoli. La fissione dei nuclei di uranio o di plutonio è la fonte dell'energia che produce l'esplosione di una bomba atomica e dei reattori nucleari.

FOTONE, Una particella di luce o di qualsiasi altro tipo di radiazione elettromagnetica (radio, microonde, infrarossa, ultravioletta, raggi X, raggi gamma); la particella associata, secondo il dualismo onda/particella, alle onde elettromagnetiche.

FREQUENZA, Il tasso al quale oscilla un'onda, ossia il numero di cicli di oscillazione al secondo.

FRONTE DI SHOCK, Un luogo in un flusso di gas in cui la densità e la temperatura del gas aumentano all'improvviso in misura ingente.

FUGA, VELOCITÀ DI, La velocità con cui un oggetto deve essere lanciato dalla superficie di un corpo gravitante per sottrarlo alla sua attrazione gravitazionale.

FUNZIONE, Un'espressione matematica che dice in che modo una quantità, ad esempio la circonferenza dell'orizzonte di un buco nero, dipende da un'altra quantità, ad esempio la massa del buco nero; in questo esempio la funzione è $C = 4\pi GM/c^2$, dove C è la circonferenza, M è la massa, G è la costante gravitazionale di Newton e c è la velocità della luce.

FUSIONE NUCLEARE, La fusione di due piccoli nuclei atomici per formarne uno più grande. Il Sole si mantiene caldo e le bombe all'idrogeno esplodono grazie alla fusione di nuclei di idrogeno, deuterio, e trizio che formano nuclei di elio.

GALASSIA, Un insieme che comprende da un miliardo a mille miliardi di stelle orbitanti attorno a un centro comune. Le galassie hanno di solito un diametro di circa 100.000 anni luce.

GAS DI COLLISIONE, Gas riscaldato e compresso in un fronte di shock.

GEODETICA, Una linea retta in uno spazio curvo o nello spaziotempo curvo. Sulla superficie della Terra i meridiani sono linee geodetiche.

GETTO, Un fascio di gas che trasporta energia dal motore centrale di una radiogalassia o di un quasar a lobi distanti che emettono onde radio.

GIROSCOPIO, Un oggetto che ruota rapidamente mantenendo l'asse di rotazione costantemente fisso per un periodo di tempo molto lungo.

GRAVITÀ SUPERFICIALE, Grosso modo, la forza dell'attrazione gravitazionale avvertita da un osservatore in stato di quiete appena sopra l'orizzonte di un buco nero (più esattamente: quella attrazione gravitazionale moltiplicata per la quantità di dilatazione gravitazionale del tempo nel luogo in cui si trova l'osservatore).

GRAVITAZIONALE, DILATAZIONE DEL TEMPO, Il rallentamento del flusso del tempo in prossimità di un corpo gravitante.

GRAVITAZIONALE, INTERRUZIONE, L'espressione usata da Oppenheimer per indicare la formazione di un buco nero attorno a una stella che implode.

GRAVITAZIONALE, LENTE, L'azione con cui un corpo gravitante, come un buco nero o una galassia, concentra la luce proveniente da una sorgente distante deflettendone i raggi; si veda LUCE, DEFLESSIONE DELLA.

GRAVITAZIONALE, MAREA, Accelerazioni gravitazionali che comprimono gli oggetti lungo una direzione e li tendono verso un'altra. La marea gravitazionale prodotta dal Sole e dalla Luna è responsabile delle maree degli oceani della Terra.

GRAVITAZIONALE, ONDA, Un'increspatura della curvatura dello spaziotempo che viaggia alla velocità della luce.

GRAVITAZIONALE, SPOSTAMENTO VERSO IL ROSSO, L'allungamento della lunghezza d'onda della luce (l'arrossamento del suo colore) quando si propaga verso l'alto attraverso un campo gravitazionale.

GRAVITONE, La particella che, secondo il dualismo onda/particella è associata alle onde gravitazionali.

IDROGENO, BOMBA ALLO, Una bomba la cui potenza esplosiva deriva dalla fusione di nuclei di idrogeno, deuterio e trizio per formare nuclei di elio. Si veda anche SUPERBOMBA.

IMPLOSIONE, La contrazione ad alta velocità di una stella provocata dall'attrazione della sua stessa gravità.

INERZIA, La resistenza di un corpo a venire accelerato da forze che agiscono su esso.

INERZIALE, QUADRO DI RIFERIMENTO, Un quadro di riferimento che non ruota e su cui nessuna forza esterna esercita spinta o attrazione. Il moto di un simile quadro di riferimento è determinato solo dalla sua inerzia. Si veda anche INERZIALE, QUADRO DI RIFERIMENTO LOCALE.

INERZIALE, QUADRO DI RIFERIMENTO LOCALE, Un quadro di riferimento sul quale non agisce nessuna forza eccetto quella di gravità, che cade liberamente in conseguenza dell'attrazione esercitata dalla gravità e abbastanza piccolo da rendere trascurabili al suo interno le accelerazioni dovute alla marea gravitazionale.

INFRAROSSA, RADIAZIONE, Onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda poco più lunga della luce; si veda la figura 2 del Prologo.

INSTABILE, La proprietà di un oggetto per cui se viene lievemente perturbato la perturbazione si espanderà modificando molto l'oggetto e forse distruggendolo. Anche detto, con una terminologia più completa, «instabile rispetto alla piccole perturbazioni».

INTERFERENZA, Il modo in cui due onde, sovrapponendosi e sommandosi linearmente, si rafforzano reciprocamente quando le creste combaciano con le creste e le valli con le valli (interferenza costruttiva), e si cancellano reciprocamente quando le creste combaciano con le valli (interferenza distruttiva).

INTERFEROMETRIA, Il processo con cui si fanno interferire due o più onde tra loro.

INTERFEROMETRICO, RILEVATORE, Un rilevatore di onde gravitazionali in cui le forze di marea delle onde fanno vibrare masse appese a cavi e viene usata l'interferenza di raggi laser per monitorarne i movimenti. Anche detto, INTERFEROMETRO.

INTERFEROMETRO, Un congegno basato sull'interferenza delle onde. Si veda anche RADIOINTERFEROMETRO E RILEVATORE INTERFEROMETRICO.

INTERGALATTICO, SPAZIO, Lo spazio tra le galassie.

INTERSTELLARE, SPAZIO, Lo spazio tra le stelle della nostra galassia, la Via Lattea.

IPERSPAZIO, Uno spazio piatto fittizio in cui si immaginano, come se vi fossero incassate, parti dello spazio curvo del nostro Universo.

IONE, Un atomo che ha perso qualcuno degli elettroni dei suoi orbitali e pertanto ha una carica netta positiva.

IONIZZATO, GAS, Gas in cui un'ampia frazione degli atomi ha perso gli elettroni dei suoi orbitali.

LEGGE DI GRAVITÀ DELL'INVERSO DEL QUADRATO, La legge di gravità di Newton, che afferma che tra ogni coppia di oggetti nell'Universo agisce una forza gravitazionale che attira gli oggetti l'uno verso l'altro e che tale forza è direttamente proporzionale al prodotto delle masse degli oggetti e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

LEGGE DI GRAVITÀ DI NEWTON, Si veda LEGGE DI GRAVITÀ DELL'INVERSO DEL QUADRATO.

LEGGI DELLA FISICA, Principi fondamentali dai quali si può dedurre, attraverso la logica e i calcoli matematici, come si comporta il nostro Universo.

LEGGI DELLA FISICA NEWTONIANE, Le leggi della fisica basate sul concetto di spazio e tempo assoluti di Newton che costituivano il perno della visione dell'Universo nel XIX secolo.

LEGGI DELL'ELETTROMAGNETISMO DI MAXWELL, Il corpus di leggi della fisica con cui James Clerk Maxwell ha unificato tutti i fenomeni elettromagnetici. A partire da queste leggi si può prevedere, attraverso calcoli matematici, il comportamento dell'elettricità, del magnetismo e delle onde elettromagnetiche.

LIGO, Laser Interferometer Gravitational-Wave Osservatory (osservatorio delle onde gravitazionali basato sull'interferometro laser).

LINEA DEL MONDO, Il tragitto di un oggetto attraverso lo spaziotempo o attraverso un diagramma spaziotemporale.

LINEARE, La proprietà di combinare assieme per semplice addizione.

LOBO, Un'enorme nube di gas che emette onde radio al di fuori di una galassia o di un quasar.

LUCE, Il tipo di onde elettromagnetiche che può essere visto dall'occhio umano, si veda la figura 2 del Prologo.

LUCE, DEFLESSIONE DELLA, La deflessione della direzione di propagazione della luce e di altre onde elettromagnetiche che avviene quando esse passano accanto al Sole o a qualsiasi altro corpo gravitante. La deflessione è prodotta dalla curvatura dello spaziotempo attorno a tale corpo.

LUNGHEZZA, CONTRAZIONE DELLA, La contrazione della lunghezza di un oggetto in conseguenza del suo passare accanto al soggetto che la misura. La contrazione avviene solo lungo la direzione del moto.

MACCHINA DEL TEMPO, Un congegno per viaggiare indietro nel tempo. Nel gergo dei fisici, «curva chiusa di tipo tempo».

MAGNETICO, CAMPO, Il campo che produce la forza magnetica.

MAGNETICO, LINEE DEL CAMPO, Linee che puntano nella direzione di un campo magnetico (ossia, nella direzione che indicherebbe l'ago di una bussola se venisse collocato in un campo magnetico). Queste linee del campo possono essere rese visibili attorno a un magnete collocandovi sopra un foglio di carta e spargendovi della limatura di ferro.

MASSA, Una misura della quantità di materia in un oggetto (l'inerzia di un oggetto è proporzionale alla sua massa e Einstein ha dimostrato che la massa è in realtà una forma molto compatta di energia). La parola «massa» è usata anche per indicare «un oggetto fatto di massa» in contesti in cui l'inerzia dell'oggetto è importante.

MATERIA FREDDA E MORTA, Materia fredda in cui tutte le reazioni nucleari sono avvenute, espellendo dalla materia tutta l'energia nucleare che poteva essere eliminata.

METAPRINCIPIO, Un principio cui tutte le leggi fisiche devono obbedire. Il principio della relatività è un esempio di metaprincipio.

METODI GLOBALI, Tecniche matematiche basate su una combinazione di topologia e geometria usate per analizzare la struttura dello spaziotempo.

MICROSECONDO, Un milionesimo di secondo.

MICROONDE, Radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda un po' più corta delle onde radio; si veda la figura 2 del Prologo.

MISURAZIONE STROBOSCOPICA, Un tipo specifico di misurazione quantistica senza demolizione in cui viene effettuata una sequenza molto rapida di misurazioni di una sbarra che vibra, ognuna delle quali separata da un periodo di vibrazione.

MOLECOLA, Un'entità costituita da diversi atomi che condividono la loro nube di elettroni uno con l'altro. L'acqua è una molecola fatta in questo modo da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno.

NANA BIANCA, Una stella con la circonferenza all'incirca uguale a quella della Terra ma con la massa del Sole, che ha esaurito tutto il suo combustibile nucleare e si sta gradualmente raffreddando. Resiste alla compressione esercitata dalla propria gravità grazie alla pressione degenere degli elettroni.

NEBULOSA, Una nube di gas brillante che riluce nello spazio interstellare. Prima degli anni Trenta le galassie erano comunemente, ma non universalmente, confuse con le nebulose.

NEUTRINO, Una particella molto leggera che somiglia al fotone eccetto per il fatto che quasi non interagisce affatto con la materia. I neutrini prodotti al centro del Sole, ad esempio, attraversano la materia che lo circonda senza venire praticamente assorbiti o spostati.

NEUTRONE, Una particella subatomica. I neutroni e i protoni, tenuti insieme dalla forza nucleare, costituiscono i nuclei degli atomi.

NEUTRONI, NUCLEO DI, Il nome dato da Oppenheimer a una stella di neutroni. Anche una stella di neutroni al centro di una stella normale.

NEUTRONI, STELLA DI, Una stella all'incirca della stessa massa del Sole ma dalla circonferenza compresa appena tra 50 e 1000 chilometri, costituita da neutroni strettamente assemblati insieme dalla forza di gravità.

NSF, National Science Foundation, l'organismo del governo degli Stati Uniti cui è demandato il sostegno alla ricerca scientifica di base.

NON LINEARE, La caratteristica di combinare insieme in modi più complicati che non per semplice addizione.

NOVA, Un'esplosione brillante di luce proveniente da una stella vecchia, che oggi si sa essere provocata da un'esplosione nucleare negli strati esterni della stella.

NUCLEARE, COMBUSTIONE, Reazioni di fusione nucleare che mantengono calde le stelle e fanno esplodere le bombe all'idrogeno.

NUCLEARE, FORZA, Anche detta «interazione forte». La forza che agisce tra protoni e protoni, protoni e neutroni e neutroni e neutroni e che tiene insieme i nuclei atomici. Quando le particelle sono un po' distanti tra loro la forza nucleare è attrattiva, quando sono più vicine è diventa repulsiva. La forza nucleare è responsabile di gran parte della pressione vicino al centro di una stella di neutroni.

NUCLEARE, REATTORE, Un congegno in cui una reazione a catena di fissioni nucleari viene usata per generare energia, produrre plutonio e, in alcuni casi, elettricità.

NUCLEARE, REAZIONE, La fusione di diversi nuclei atomici per formarne uno più grande (fusione), o la scissione di un nucleo più grande in diversi più piccoli (fissione).

NUCLEO ATOMICO, Il denso centro di un atomo. I nuclei atomici hanno carica elettrica positiva, sono fatti di neutroni e protoni tenuti insieme dalla forza nucleare.

NUCLEONE, Neutrone o protone.

NUOVA MECCANICA QUANTISTICA, La versione finale delle leggi della meccanica quantistica formulata nel 1926.

OGGETTO IN CADUTA LIBERA, Un oggetto su cui non viene esercitata nessun'altra forza oltre a quella di gravità.

ONDA, Un'oscillazione in un campo (ad esempio, il campo elettromagnetico o la curvatura dello spaziotempo) che si propaga attraverso lo spaziotempo.

ONDA, FORMA DI, Una curva che mostra i particolari delle oscillazioni di un'onda.

ONDA, LUNGHEZZA DI, La distanza tra due creste di un'onda.

ONDE RADIO, Onde elettromagnetiche di frequenza molto bassa, usate dagli esseri umani per trasmettere segnali radio e utilizzate dagli astronomi per studiare oggetti astronomici distanti; si veda la figura 2 del Prologo.

ORBITALE, PERIODO, Il tempo impiegato da un oggetto in orbita attorno a un altro per compiere un giro completo intorno al compagno.

ORIZZONTE, La superficie di un buco nero, il punto di non ritorno dal quale nulla può riemergere. Anche detto *orizzonte assoluto*, per distinguerlo dall'*orizzonte apparente*.

ORIZZONTE APPARENTE, La regione più esterna di un buco nero, dove i fotoni che cercano di fuoriuscire vengono trascinati indietro dalla gravità. Coincide con l'*orizzonte* (*assoluto*) solo quando il buco nero è in stato quiescente, immutabile.

ORIZZONTE ASSOLUTO, La superficie di un buco nero. Si veda *orizzonte*.

OSSERVATORE, Un soggetto (di solito ipotetico) che effettua una misurazione.

PARADIGMA, Insieme di strumenti che una comunità di scienziati usa nelle sue ricerche su un dato tema e per comunicarne i risultati agli altri.

PARTICELLA, Un oggetto minuscolo, uno dei costituenti di base della materia (come un elettrone, un protone, un fotone o un gravitone).

PARTICELLA ELEMENTARE, Una particella subatomica di materia o antimateria. Tra le particelle elementari figurano elettroni, protoni, neutroni, positroni, antiprotoni e antineutroni.

PARTICELLA LIBERA, Una particella sulla quale non agisce nessuna forza, ossia una particella che si muove unicamente per influenza della sua inerzia. In presenza di gravità, una particella sulla quale non agiscono forze *eccetto* quella di gravità.

PARTICELLE VIRTUALI, Particelle create a coppie usando l'energia presa in prestito da una regione vicina dello spazio. Le leggi della meccanica quantistica richiedono che l'energia venga restituita rapidamente, perciò le particelle virtuali si annichiliscono rapidamente e non possono essere catturate. Le particelle virtuali sono l'aspetto particellare delle fluttuazioni del vuoto, viste da osservatori in caduta libera. I fotoni virtuali e i gravitoni virtuali sono gli aspetti particellari delle fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto e delle fluttuazioni gravitazionali del vuoto, rispettivamente. Si veda anche DUALISMO ONDA/PARTICELLA.

«PELI», Qualsiasi proprietà che un buco nero può emettere sotto forma di radiazione e che quindi non può mantenere, ad esempio un campo magnetico o una montagna sul suo orizzonte

PERIELIO, Il punto in cui un pianeta si trova più vicino al Sole lungo la sua orbita attorno a esso.

PERIELIO DI MERCURIO, SLITTAMENTO DELLO, La piccola irregolarità dell'orbita ellittica di Mercurio che non si chiude perfettamente su se stessa, dando luogo a uno slittamento di posizione ogni volta che il pianeta passa per il perielio.

PERTURBATIVI, METODI, Metodi per analizzare matematicamente i comportamenti di piccole perturbazioni di un oggetto, ad esempio un buco nero.

PERTURBAZIONE, Una piccola distorsione (rispetto alla forma normale) di un oggetto o della curvatura dello spaziotempo attorno a un oggetto.

PIEZOELETTRICO, CRISTALLO, Un cristallo che produce un voltaggio quando subisce una tensione o una pressione.

PLANCK, COSTANTE DI, Una costante fondamentale, indicata con $\hbar$, che entra nelle leggi della meccanica quantistica, il rapporto tra l'energia di un fotone e la sua frequenza angolare (ossia, 2π volte la sua frequenza); $1{,}055 \times 10^{-27}$ erg-secondo.

PLANCK-WHEELER, LUNGHEZZA, AREA E TEMPO DI, Quantità associate con le leggi della gravità quantistica. La lunghezza di Planck-Wheeler $\sqrt{G\hbar/c^3} = 1{,}62 \times 10^{-33}$ centimetri è la scala di lunghezza al di sotto della quale lo spazio come noi lo conosciamo cessa di esistere e diventa schiuma quantistica. Il tempo di Planck-Wheeler ($1/c$ volte la lunghezza di Planck-Wheeler o circa 10^{-43} secondi) è l'intervallo di tempo più breve che possa esistere; se due eventi sono separati da un intervallo minore di questo non è possibile dire quale venga prima e quale dopo. L'area di Planck-Wheeler, il quadrato della lunghezza di Planck-Wheeler, ossia $2{,}61 \times 10^{-66}$ centimetri quadrati, svolge un ruolo centrale nell'entropia di un buco nero. Nelle formule precedenti $G = 6{,}670 \times 10^{-8}$ dine-centimetro^2/grammo^2 è la costante gravitazionale di Newton, $\hbar = 1{,}055 \times 10^{-27}$ erg-secondo è la costante di Planck della meccanica quantistica, e $c = 2{,}998 \times 10^{10}$ centimetro/secondo è la velocità della luce.

PLASMA, Gas caldo, ionizzato, elettricamente conduttivo.

PLUTONIO-239, Un tipo specifico di nucleo atomico di plutonio che contiene 239 tra protoni e neutroni (94 protoni e 145 neutroni).

POLARIZZATA, LUCE; POLARIZZATE, ONDE GRAVITAZIONALI, Luce o onde gravitazionali in cui una delle due polarizzazioni è completamente assente (scomparsa).

POLARIZZATO, CORPO, Un corpo con una carica elettrica negativa concentrata in una regione e una carica positiva concentrata in un'altra regione.

POLARIZZAZIONE, La caratteristica per cui le onde elettromagnetiche e gravitazionali consistono di due componenti, una che oscilla in una direzione o insieme di direzioni, e l'altra in una direzione o insieme di direzioni diverse. Le due componenti sono dette le due polarizzazioni delle onde.

POSTDOC, Assegnista di ricerca. Un individuo che abbia conseguito il Ph.D. e continui la sua formazione sulle modalità della ricerca, di solito sotto la guida di un ricercatore esperto.

PRESSIONE, La quantità di forza diretta verso l'esterno che la materia produce quando viene compressa.

PRESSIONE DI DEGENERAZIONE, Pressione all'interno della materia a elevata densità prodotta dai movimenti erratici, ad alta velocità indotti dal dualismo onda/particella di elettroni o neutroni. Questo tipo di pressione resta forte quando la materia si raffredda fino alla temperatura dello zero assoluto.

PRESSIONE TERMICA, Pressione creata dai movimenti casuali, indotti dal calore, degli atomi, delle molecole, degli elettroni e/o di altre particelle.

PRICE, TEOREMA DI, Il teorema secondo cui tutte le proprietà di un buco nero che possono essere convertite in radiazione lo saranno e verranno emesse completamente, rendendo in tal modo il buco nero «privo di peli».

PRINCIPIO DELL'ASSOLUTEZZA DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE, Il principio di Einstein secondo cui la velocità della luce è una costante universale, identica in tutte le direzioni e in ogni quadro di riferimento inerziale, indipendentemente dal moto del quadro.

PRINCIPIO DELLA RELATIVITÀ, Il principio di Einstein secondo cui le leggi della fisica non dovrebbero poter distinguere un quadro di riferimento inerziale dall'altro; ossia, esse dovrebbero assumere la stessa forma in qualsiasi quadro di riferimento inerziale. In presenza di gravità il principio è lo stesso, ma il ruolo di quadri di riferimento inerziali è svolto da quadri di riferimento inerziali locali.

PRINCIPIO DI EQUIVALENZA, Il principio secondo cui in un quadro di riferimento inerziale locale in presenza di gravità tutte le leggi della fisica dovrebbero assumere la stessa forma che hanno in un quadro di riferimento inerziale in assenza di gravità.

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE, Legge meccanico-quantistica che afferma che, se si misura la posizione di un oggetto o l'intensità di un campo con elevata precisione, la misurazione stessa deve necessariamente perturbare la velocità dell'oggetto o il tasso di cambiamento del campo in misura imprevedibile.

PULSAR, Una stella di neutroni pulsante e magnetizzata che emette un fascio di radiazioni (onde radio e a volte anche luce e raggi X). Poiché la stella ruota, il fascio gira come un faro: ogni volta che il fascio passa accanto alla Terra agli astronomi arriva una pulsazione della radiazione.

PULSAZIONE, La vibrazione o oscillazione di un oggetto, ad esempio un buco nero, una stella o una campana.

QUADRO DI RIFERIMENTO, Un laboratorio (possibilmente immaginario) per effettuare misurazioni fisiche, che si muove attraverso l'Universo in un determinato modo.

QUANTISTICA, GRAVITÀ, Le leggi della fisica ottenute unificando la relatività generale con la meccanica quantistica.

QUANTISTICA, MECCANICA, Le leggi della fisica che governano il regno del microscopico (atomi, molecole, elettroni, protoni) e che sono alla base anche del regno del macroscopico, ma che raramente si manifestano a quel livello. Tra i fenomeni previsti dalla meccanica quantistica vi sono il PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE, il DUALISMO ONDA/PARTICELLA e le FLUTTUAZIONI DEL VUOTO.

QUANTISTICA, MISURAZIONE SENZA DEMOLIZIONE, Un metodo di misurazione che evita il limite quantistico standard.

QUANTISTICA, SCHIUMA, Una struttura dello spazio probabilistica e simile a una schiuma che forse costituisce il centro delle singolarità e che probabilmente è presente nello spazio ordinario su scale della lunghezza di Planck-Wheeler o inferiori.

QUANTISTICA, TEORIA, Lo stesso che meccanica quantistica.

QUANTISTICO, LIMITE STANDARD, Un limite dovuto al principio di indeterminazione che riguarda la precisione con cui certe quantità possono essere misurate usando metodi standard. Questo limite può essere evitato usando i metodi quantistici senza demolizione.

QUASAR, Un oggetto compatto, molto luminoso nell'Universo distante, che si ritiene alimentato da un buco nero gigante.

RADIAZIONE, Qualsiasi forma di particelle o onde ad alta velocità.

RADIAZIONE DI SINCROTRONE, Onde elettromagnetiche emesse da elettroni ad alta velocità che si muovono tracciando continuamente spirali intorno alle linee del campo magnetico.

RADIAZIONE ULTRAVIOLETTA, Radiazione elettromagnetica con una lunghezza d'onda un po' più corta di quella della luce; si veda la figura 2 del Prologo.

RADIOASTRONOMO, Un astronomo che studia l'Universo usando le onde radio.

RADIOGALASSIA, Una galassia che emette intense onde radio.

RADIOINTERFEROMETRO, Un congegno che consiste in diversi radiotelescopi collegati insieme e simula un unico radiotelescopio molto più grande.

RADIOSORGENTE, Qualsiasi oggetto astronomico che emetta onde radio.

RADIOTELESCOPIO, Un telescopio che osserva l'Universo usando onde radio.

RAGGI GAMMA, Onde elettromagnetiche con lunghezze d'onda estremamente corte; si veda la figura 2 del Prologo.

RAGGI X, Onde elettromagnetiche con una lunghezza d'onda compresa tra quella della radiazione ultravioletta e i raggi gamma; si veda la figura 2 del Prologo.

REAZIONE A CATENA, Una sequenza di fissioni di nuclei atomici in cui i neutroni prodotti da una fissione provocano altre fissioni e i neutroni che ne derivano ne provocano a loro volta delle altre e così via.

RELATIVITÀ GENERALE, Le leggi della fisica di Einstein in cui la gravità è descritta da una curvatura dello spaziotempo.

RELATIVITÀ RISTRETTA, Le leggi della fisica di Einstein in assenza di gravità.

RELATIVO, Che dipende dal quadro di riferimento di un soggetto; è diverso se misurato in un quadro che si muove nell'Universo in un modo rispetto a quando viene misurato in un altro quadro che si muove in un altro modo.

RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE, o semplicemente RESISTENZA. Anche detto indice adiabatico. La percentuale in cui la pressione all'interno della materia aumenta quando la densità aumenta dell'1%.

RIGHE SPETTRALI, Linee nette nello spettro della luce emessa da una sorgente. Tali linee sono dovute a un'emissione o a un assorbimento intensi a lunghezze d'onda specifiche, prodotte da atomi o molecole specifici.

RIGORE; RIGOROSO, Un elevato grado di precisione, esattezza e affidabilità (un termine applicato ai calcoli e agli argomenti matematici).

SBARRE, RILEVATORE A, Un rilevatore di onde gravitazionali in cui le onde tendono e comprimono una grande sbarra di metallo e un sensore ne monitora le vibrazioni.

SCHWARZSCHILD, GEOMETRIA DI, La geometria dello spaziotempo intorno e all'interno di un buco nero sferico non rotante.

SCO X-1. Scorpius X-1, la stella a raggi X più brillante del cielo.

SECONDA LEGGE DELLA TERMODINAMICA, La legge secondo cui l'entropia non può mai diminuire e aumenta quasi sempre.

SENSIBILITÀ, Il segnale più debole che può essere misurato da una determinata apparecchiatura. In alternativa, la capacità di un'apparecchiatura di misurare segnali.

SENSORE, Un apparecchio per monitorare le vibrazioni di una sbarra o i movimenti di una massa.

SINGOLARITÀ, Una regione dello spaziotempo in cui la curvatura diventa così forte che le leggi della relatività generale perdono di validità e prevalgono le leggi della gravità quantistica. Se si cerca di descrivere una singolarità usando solo la relatività generale si scopre (erroneamente) che lì la marea gravitazionale e la curvatura dello spaziotempo sono infinitamente forti. La gravità quantistica probabilmente sostituisce queste infinità con la schiuma quantistica.

SINGOLARITÀ BKL, Una singolarità in prossimità della quale la marea gravitazionale oscilla caoticamente sia nel tempo che nello spazio. È probabilmente il tipo di singolarità che si forma al centro dei buchi neri e nel big crunch del nostro Universo.

SINGOLARITÀ DI SCHWARZSCHILD, L'espressione usata tra il 1916 e all'incirca il 1958 per descrivere quello che oggi chiamiamo un buco nero.

SINGOLARITÀ FRULLATORE (MIXMASTER), Una singolarità in prossimità della quale la marea gravitazionale oscilla caoticamente nel tempo ma non necessariamente cambia nello spazio. Si veda anche SINGOLARITÀ BKL.

SINGOLARITÀ NUDA, Una singolarità che non si trova all'interno di un buco nero (non circondata dall'orizzonte di un buco nero) e che pertanto può essere vista e studiata dall'esterno. Si veda CONGETTURA DELLA CENSURA COSMICA.

SIRIO B, La nana bianca che orbita attorno alla stella Sirio.

SPAZIOTEMPO, Il «tessuto» quadridimensionale che si trova quando spazio e tempo sono unificati.

SPAZIOTEMPO, CURVATURA DELLO, La proprietà dello spaziotempo che dà luogo a particelle in caduta libera che inizialmente si muovono lungo linee del mondo parallele per poi avvicinarsi o allontanarsi. La curvatura dello spaziotempo e la MAREA GRAVITAZIONALE sono nomi diversi per la stessa cosa.

SPAZIOTEMPO, DEFORMAZIONE DELLO, Lo stesso che CURVATURA DELLO SPAZIOTEMPO.

SPETTRO, La gamma di lunghezze d'onda o di frequenze sulle quali possono esistere le onde elettromagnetiche, da onde radio a frequenze estremamente basse, passando per la luce fino a raggi gamma dalle frequenze estremamente alte; si veda la figura 2 del Prologo. È anche una raffigurazione della distribuzione della luce in funzione della frequenza (o lunghezza d'onda), ottenuta facendo passare la luce per un prisma.

SPETTROGRAFO, Una versione sofisticata di un prisma per separare i vari colori (lunghezze d'onda) della luce e in tal modo misurarne lo spettro.

SPIN, Rotazione; si veda *momento angolare*.

SPOSTAMENTO VERSO IL ROSSO, Uno spostamento delle onde elettromagnetiche verso lunghezze d'onda più lunghe, ossia un «arrossamento» delle onde.

STABILITÀ, La possibilità che un oggetto sia instabile o meno. Si veda anche INSTABILE.

STELLA COLLASSATA, Il nome utilizzato per un buco nero in Occidente negli anni Sessanta.

STELLA CONGELATA, Il nome usato per indicare un buco nero nell'Urss durante gli anni Sessanta.

STELLA SCURA, Espressione usata verso la fine del XVIII e l'inizio del XIX secolo per descrivere quello che oggi chiamiamo buco nero.

STELLA SUPERMASSIVA, Una stella ipotetica che pesi quanto o più di diecimila Soli.

STRUTTURA DI UNA STELLA, Le modalità con cui cambiano la pressione, la densità, la temperatura e la gravità di una stella se dalla sua superficie si procede verso il centro.

SUPERBOMBA, Una bomba all'idrogeno che usa un principio in base al quale si può produrre un'esplosione di potenza arbitraria.

SUPERCONDUTTORE. Un materiale che conduce l'elettricità perfettamente senza alcuna resistenza.

SUPERNOVA. La gigantesca esplosione di una stella morente. L'esplosione degli strati esterni della stella è alimentata dall'energia che viene rilasciata quando il nucleo interno implode e forma una stella di neutroni.

TERMODINAMICA, L'insieme di leggi fisiche che governano il comportamento statistico, aleatorio di grandi numeri di atomi e molecole, compreso il loro calore.

TERMONUCLEARI, REAZIONI, Reazioni nucleari indotte dal calore.

TOPOLOGIA, Il ramo della matematica che si occupa dei modi qualitativi con cui gli oggetti sono connessi l'uno con l'altro o con se stessi. Ad esempio, la topologia distingue una sfera (che non ha buchi) da una ciambella (che ne ha uno).

TRIZIO, Nuclei atomici costituiti da un protone e due neutroni legati tra loro dalla forza nucleare.

UNIVERSO, Una regione dello spazio scollegata da altre regioni come un'isola è scollegata dal resto della terraferma.

UNIVERSO, Il nostro universo.

URANIO-235, Un tipo specifico di nucleo di uranio che contiene 235 tra protoni e neutroni (92 protoni e 143 neutroni).

VECCHIA MECCANICA QUANTISTICA, La prima versione delle leggi della meccanica quantistica elaborata nei primi due decenni del XX secolo.

VIA LATTEA, La galassia in cui viviamo.

VUOTO, Una regione dello spazio da cui sono state eliminate tutte le particelle, i campi e l'energia che sia possibile eliminare; la sola cosa che vi resta sono le inamovibili fluttuazioni del vuoto.

VUOTO, FLUTTUAZIONI DEL, Oscillazioni aleatorie, imprevedibili e inamovibili di un campo (ad esempio un campo elettromagnetico o gravitazionale) provocate da un braccio di ferro in cui piccole regioni dello spazio sottraggono momentaneamente energia ad altre regioni adiacenti e poi la restituiscono. Si veda anche VUOTO e PARTICELLE VIRTUALI.

NOTE DI APPROFONDIMENTO

Cosa mi rende sicuro di quello che dico?

FONTI E ABBREVIAZIONI

Le fonti qui citate sono elencate nella Bibliografia.
Le abbreviazioni utilizzate sono le seguenti:

ECP-1 The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 1, citato nella Bibliografia come ECP-1
ECP-2 The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 2, citato nella Bibliografia come ECP-2
INT Interviste realizzate dall'autore, elencate all'inizio della Bibliografia
MTW Misner, Thorne e Wheeler (1973)

PROLOGO

p. 19 [Di tutte le cose... a individuarli]: Questo paragrafo è adattato da Thorne (1974).

p. 22 [In base al periodo orbitale... («10 masse solari»)]: La formula di Newton è $M_h = C_o^3/(2\pi G P_o^2)$ dove M_h è la massa del buco (o di qualsiasi altro corpo orbitante), C_o e P_o sono la circonferenza e il periodo di qualsiasi orbita circolare attorno al buco, π è 3,14159... e G è la costante gravitazionale di Newton, $1{,}327 \times 10^{11}$ chilometri^3 per secondo^2 per massa solare. Si veda la nota 1 del capitolo I. Inserendo in questa formula il periodo orbitale della nave spaziale P_o = 5 minuti e 46 secondi, e la sua circonferenza orbitale $C_o = 10^6$ chilometri, si ottiene una massa M_h = 10 masse solari (una massa solare = $1{,}989 \times 10^{30}$ chilogrammi).

p. 24 [Quanto alle dimensioni... massa solare]: La formula per la circonferenza dell'orizzonte è $C_h = 4\pi G M_h/c^2$ = 18,5 chilometri x $(M_h/M_\odot)$ dove M_h è la massa

del buco, G è la costante gravitazionale di Newton (si veda sopra), $c = 2{,}998 \times 10^5$ chilometri per secondo è la velocità della luce e $M_\odot = 1{,}989 \times 10^{30}$ chilogrammi è la massa del Sole. Si vedano i capitoli XXXI e XXXII di MTW.

p. 31 [In onore di queste maree… *forza di marea*]: La forza di marea espressa come accelerazione relativa tra la vostra testa e i vostri piedi (o tra altri due oggetti qualsiasi) è $\Delta a = 16\pi^3 G(M_h/C^3)L$, dove G è la costante gravitazionale di Newton (si veda sopra), M_h è la massa del buco nero, C è la circonferenza sulla quale vi trovate e L è la distanza tra la vostra testa e i vostri piedi. Si noti che 1 gravità terrestre è 9,81 metri per secondo^2. Si veda, ad es., p. 29 di MTW.

p. 32 [La relatività generale… diminuisce]: La formula precedente dà per la forza di marea $\Delta a \propto M_h/C^3$. Quando la circonferenza è prossima a quella dell'orizzonte, $C \propto M_h$ (nota a p. 28), pertanto $\Delta a \propto 1/M_h^2$.

p. 33 [La distanza totale di 30.100 anni luce… solo venti anni]: Il tempo dell'astronave T_{astr}, il tempo della Terra T_T e la distanza D percorsa sono collegati da $T_T = (2c/g)\sinh(gT_{astr}/2c)$ e $D = (2c^2/g)[\cosh(gT_{astr}/2c) - 1]$, dove g è l'accelerazione della nave («una gravità terrestre», 9,81 metri per secondo^2), c è la velocità della luce, e sinh e cosh sono le funzioni iperboliche di seno e coseno. Si veda, ad es. il cap. VI di MTW. Per viaggi che durano molto più di un anno queste formule diventano approssimativamente $T_T = D/c$ e $T_{astr} = (2c/g)\ln(gD/c^2)$, dove ln è il logaritmo naturale.

p. 34 [per rimanere su un'orbita circolare… ti ha risucchiato all'interno]: Per un'analisi matematica delle orbite circolari (o di altro tipo) attorno a un buco nero non rotante si veda, ad es., il cap. XXV di MTW, in particolare la scheda 25.6.

p. 36 [I vostri calcoli indicano… 1,0001 volte quella del suo orizzonte]: La forza di accelerazione che avvertirete galleggiando su una circonferenza C al di sopra di un buco nero di massa M_h e circonferenza dell'orizzonte C_h è $a = 4\pi^2 G(M_h/c^2) \times (1/\sqrt{1 - C_h/C})$, dove G è la costante gravitazionale di Newton. Se siete molto vicini all'orizzonte $C \simeq C_h \propto M_h$, che implica $a \propto 1/M_h$.

p. 36 [Utilizzando la consueta accelerazione 1-g,… a bordo della nave spaziale]: Si veda la nota a p. 33.

p. 39 [L'apertura è piccola… visto dalla Terra]: Se si galleggia su una circonferenza C poco al di sopra di un orizzonte di circonferenza C_h si vede tutta la luce dell'Universo esterno concentrata in un disco luminoso dal diametro angolare $\alpha \simeq 3\sqrt{3}\sqrt{1 - C_h/C}$ radiante $\simeq 300\sqrt{1 - C_h/C}$ gradi. Si veda, ad es., la scheda 25.7 di MTW.

p. 40 [In modo altrettanto sorprendente, i colori… luce verde di 5×10^{-7} metri]: Se si galleggia su una circonferenza C poco al di sopra di un orizzonte di circonferenza C_h si vedono le lunghezze d'onda λ di tutta la luce proveniente dall'Universo esterno spostata gravitazionalmente verso il blu (l'inverso dello spostamento gravitazionale verso il rosso) di $\lambda_{ricevuta}/\lambda_{emessa} = \sqrt{1 - C_h/C}$. Si veda, ad es., p. 657 di MTW.

p. 44 [Dopo aver inserito questi numeri… sette giorni a partire da ora]: Quando

due buchi neri, ognuno di massa M_h, orbitano l'uno intorno all'altro separati da una distanza D, hanno un periodo orbitale di $2\pi\sqrt{D^3/2GM_h}$ e il contraccolpo delle loro onde gravitazionali li obbliga a muoversi lungo una spirale a rientrare e fondersi dopo un tempo pari a (5/512) x $(c^5(G^3)(D^4/M_h{}^3)$. G è la costante gravitazionale di Newton e c è la velocità della luce; si veda in precedenza. Si veda, ad es., l'equazione (36.17 b) di MTW.

p. 48-49 [L'anello ha una circonferenza di 5 milioni di chilometri… curvatura dello spaziotempo]: Un individuo che si trovi su questa impalcatura ad anello a una distanza L dal suo strato centrale avverte un'accelerazione $a = (24\pi^3 GM_h/C^3)L$ verso lo strato centrale, provocata per un terzo dalla forza centrifuga della rotazione dell'anello e per due terzi dalla forza di marea del buco. G è la costante gravitazionale di Newton, M_h è la massa del buco e C è la circonferenza dello strato centrale dell'anello. Per fare un confronto, 1 gravità terrestre di accelerazione equivale a 9,81 metri per secondo^2. Si veda la nota a p. 31.

p. 52 [Le leggi della gravità quantistica… per un viaggio nel tempo]: 1,62 x 10^{-33} centimetri = $\sqrt{G\hbar/c^3}$ è la «lunghezza di Planck-Wheeler», dove G = costante gravitazionale di Newton, c = velocità della luce e $\hbar$ = costante di Planck (1,055x10^{-34} chilogrammo-metro^2 per secondo). Si vedano le pp. 514 e 539-540 del capitolo XIV.

p. 54 [Un altro è il fatto… ognuno di questi test] Si veda, ad es., Will (1986).

CAPITOLO I

p. 55 Commento generale al capitolo I: La maggior parte del materiale di questo capitolo sulla vita di Einstein proviene dalle sue biografie: Pais (1982), Hoffman (1972), Clark (1971), Einstein (1949) e Frank (1947). Per la maggior parte dell'inquadramento storico e delle citazioni del capitolo I, che ho raccolto dalle suddette biografie, non indico le singole fonti. Molto materiale storico nuovo sta diventando accessibile grazie alla graduale pubblicazione della raccolta degli scritti di Einstein ECP-1, ECP-2 e Einstein e Marić (1992). Qui di seguito cito materiale da queste fonti.

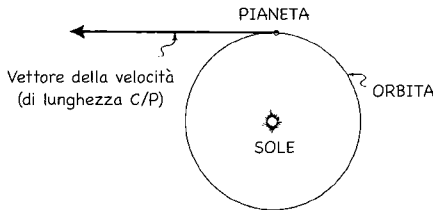
p. 55-56 [Professor Wilhelm Ostwald… Hermann Einstein]: Documento 99 in ECP-1.

p. 56 [«Il rispetto acritico… nemico della verità»]: Documento 115 di ECP-1 secondo la traduzione a pagina xix di Renn e Schulmann (1992).

p. 57 (in fondo al testo, p. 552) Nota 1 del capitolo I: Il seguente esempio illustra cosa si intende per «elaborare matematicamente» le leggi della fisica.

Agli inizi del XVII secolo Keplero dedusse dalle osservazioni dei pianeti di Tycho Brahe che il cubo della circonferenza C dell'orbita di un pianeta diviso per il quadrato del suo periodo orbitale P, ossia C^3/P^2, era lo stesso per tutti i pianeti allora conosciuti: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno. Mezzo secolo dopo Isaac Newton spiegò la scoperta di Keplero attraverso un'elaborazione mate-

matica delle leggi newtoniane del moto e della gravità (le leggi enunciate a p. 57 del testo):

1) A partire dal seguente diagramma e una discreta mole di sudore, si deduce che quando un pianeta gira intorno al Sole la sua velocità cambia a un tasso dato dalla formula (tasso di variazione della velocità) = $2\pi C/P^2$, dove π = 3,14159... Questo tasso di variazione della velocità è a volte indicato come l'*accelerazione centrifuga* che sperimenta il pianeta orbitante.

2) La seconda legge del moto di Newton ci dice che questo tasso di variazione della velocità (accelerazione centrifuga) deve essere uguale alla forza gravitazionale, F_{grav}, esercitata dal Sole sul pianeta divisa per la sua massa, in altre parole $2\pi C/P^2 = F_{grav}/M_{pianeta}$.
3) La legge gravitazionale di Newton ci dice che la forza gravitazionale F_{grav} è proporzionale alla massa del Sole M_{Sole} per la massa del pianeta $M_{pianeta}$ diviso per il quadrato della circonferenza orbitale del pianeta. Espresso come identità più che come proporzionalità $F_{grav} = 4\pi^2 G M_{Sole} M_{pianeta}/C^2$. G è la costante gravitazionale di Newton, uguale a $6{,}670 \times 10^{-20}$ chilometro^3 per secondo^2 per chilogrammo o, in modo equivalente, a $1{,}327\ 10^{11}$ chilometro^3 per secondo^2 per massa solare.
4) Inserendo questa espressione della forza gravitazionale F_{grav} nella seconda legge del moto di Newton (al precedente punto 2) si ottiene $2\pi C/P^2 = 4\pi^2 G M_{Sole}/C^2$. Moltiplicando poi entrambi i membri dell'equazione per $C^2/2\pi$ si ottiene $C^3/P^2 = 2\pi G M_{Sole}$.

Quindi, le leggi del moto e della gravità di Newton spiegano – in realtà rendono effettivo – il rapporto scoperto da Keplero: C^3/P^2 è identico per tutti i pianeti; esso dipende solo dalla costante gravitazionale di Newton e dalla massa del Sole.

Per dare un esempio dell'efficacia delle leggi della fisica, le suddette elaborazioni non solo spiegano la scoperta di Keplero, ma ci offrono anche un metodo per pesare il Sole. Dividendo l'equazione finale del punto 4 per $2\pi G$ otteniamo un'equazione per la massa del Sole, $M_{Sole} = C^3/(2\pi G P^2)$. Inserendo in questa equazione la

circonferenza *C* e il periodo *P* dell'orbita di qualsiasi pianeta misurati dagli astronomi e il valore della costante gravitazionale di Newton *G*, misurata dai fisici in laboratori ubicati sulla Terra, deduciamo che la massa del Sole è pari a $1{,}989 \times 10^{30}$ chilogrammi.

p. 58 [Weber insegna… ogni sua lezione]: Documento 39 in ECP-1; Documento 2 in Einstein e Marić (1992).

p. 59 [E poiché l'etere… stato di quiete nello spazio assoluto]: In questo capitolo ignoro le ipotesi di alcuni fisici della fine del XIX secolo secondo cui nelle vicinanze della Terra l'etere avrebbe potuto essere trascinato dal moto terrestre nello spazio assoluto. Vi erano infatti solide prove sperimentali che escludevano tale trascinamento: se vicino alla superficie della Terra l'etere era in stato di quiete rispetto a essa, non avrebbe dovuto esservi alcuna deviazione della luce stellare, ma la deviazione dovuta al moto della Terra attorno al Sole era un fatto accertato. Per una breve discussione della storia delle idee sull'etere si veda il capitolo VI di Pais (1982); per una presentazione più dettagliata si vedano i riferimenti ivi indicati.

p. 60 [Albert Michelson… di sua invenzione]: La tecnologia dell'epoca di Michelson non era in grado di confrontare la velocità *di sola andata* della luce in varie direzioni con sufficiente precisione (1 parte su 10^4) per verificare la previsione di Einstein. Tuttavia, vi era una previsione simile circa una differenza di velocità della luce in un viaggio di andata e ritorno (una differenza di circa 5 parti su 10^9 tra un viaggio di andata e ritorno parallelo al moto della Terra attraverso l'etere e uno perpendicolare). La nuova tecnica di Michelson era teoricamente adatta alla misurazione di tali differenze nei viaggi di andata e ritorno; esse erano ciò che Michelson cercò e non riuscì a trovare.

p. 61 [Al contrario, Heinrich Weber… confondere delle giovani menti]: Non so *con certezza* se Weber fosse convinto di ciò o se in particolare ritenesse inopportuno citare l'esperimento di Michelson-Morley nelle sue lezioni. Questo passaggio è un'ipotesi basata sull'assenza di qualsiasi indizio del fatto che Weber abbia illustrato nelle sue lezioni tale esperimento o le questioni da esso sollevate; si vedano gli appunti dettagliati presi da Einstein durante le sue lezioni (Documento 37 in ECP-1) e la breve descrizione (p. 62 di ECP-1) dell'unica altra raccolta di appunti delle lezioni di Weber.

p. 61 [Confrontandolo con altri esperimenti]: Gli altri esperimenti erano quelli, come le misurazioni della deviazione della luce, che implicavano che l'etere non veniva trascinato dalla Terra; si veda la nota a p. 59.

p. 61 [Una lieve (pari a cinque parti su un miliardo)… nell'esperimento di Michelson-Morley]: Si ricordi (nota a p. 60) che Michelson stava in effetti misurando le velocità della luce in viaggi di andata e ritorno alla ricerca di variazioni a seconda della direzione dell'ordine di circa cinque parti su un miliardo.

p. 62 [Se si esprimevano… (si veda la fig. 1.1c)]: Questa descrizione della legge dell'«assenza di capi delle linee del campo magnetico» e quella più dettagliata della

figura 1.1c sono la mia traduzione nel linguaggio figurato moderno di un aspetto delle equazioni di Maxwell su cui lavoravano Lorentz, Larmor e Poincaré, si vedano le pp. 123-130 di Pais (1982).

p. 62 [Se la contrazione di Fitzgerald... «dilata» il tempo]: Rendere le leggi armoniose richiedeva non solo la contrazione degli oggetti in movimento e la dilatazione del loro tempo, ma anche di fingere che la simultaneità fosse relativa, ossia che la simultaneità dipendesse dallo stato di moto del soggetto, e Lorentz, Larmor e Poincaré prestarono particolare attenzione a questo aspetto nonché alla contrazione degli oggetti e alla dilatazione del tempo.

Tuttavia, per semplicità pedagogica, lo ignoro in questo testo e riprendo la questione della simultaneità più avanti nel capitolo I.

p. 64 [Sono sempre più convinto... non sia corretta]: Documento 52 in ECP-1; Documento 8 in Einstein e Marić (1992).

p. 64 [Nei sei anni successivi... dilatazione del tempo]: È una mia ipotesi. Non sappiamo davvero in che misura la mente di Einstein si concentrasse su questi aspetti nel periodo 1890-1905. Come chiarisce Pais (1982, Sezione 6b), durante quei sei anni Einstein era ignaro della deduzione di Lorentz-Poincaré-Larmor sulla contrazione della lunghezza e sulla dilatazione del tempo basata sulle leggi di Maxwell. Detto in termini più tecnici, egli era a conoscenza della derivazione di primo ordine della trasformazione di Lorentz della velocità (compresa l'interruzione della simultaneità), ma non di quella di secondo ordine in cui si verificano la contrazione della lunghezza e la dilatazione del tempo. D'altra parte, egli era presumibilmente a conoscenza della deduzione di Fitzgerald-Lorentz della contrazione della lunghezza a partire dall'esperimento di Michelson-Morley; e sappiamo che nel suo articolo del 1905 sulla relatività egli presenta la sua derivazione dell'intera trasformazione di Lorentz, esatta in tutti gli ordini, e della contrazione della lunghezza, della dilatazione del tempo e della discrepanza nella simultaneità.

p. 65 [Alla sfacciata... Mileva Marić]: Per una descrizione della personalità di Mileva Marić ampiamente basata sulle lettere d'amore tra lei e Einstein, si veda Renn e Schulmann (1992); per le lettere d'amore si veda ECP-1 o Einstein e Marić (1992).

p. 65 [«Sono assolutamente convinto... giudizio negativo»]: Documento 94 di ECP-1; Documento 95 di Einstein e Marić (1992).

p. 65 [Avrei potuto ottenere... pelle dura]: Documento 100 di ECP-1.

p. 65 [«Questa signorina Marić... per niente]: Documento 138 di ECP-1.

p. 65 [Quella donna... malvagie come queste!]: Documento 125 di ECP-1.

p. 65 [«Sono fuori di me dalla contentezza... ex-insegnanti»]: Documento 104 di ECP-1.

p. 66 [Un figlio illegittimo... seriosa Svizzera]: ECP-1; Renn e Schulmann (1992); Einstein e Marić (1992).

p. 66 [Per la maggior parte studiando e riflettendo]: In base a varie biografie di

Einstein ipotizzo che egli passasse in questo modo la maggior parte del suo tempo libero.

p. 66 [«Stava seduto nel suo studio… continuò a lavorare»]: Seelig (1956) citato in Clark (1971).

p. 66 [A volte parlare… «Non avrei potuto… in tutta Europa»]: Ma si veda la descrizione a p. xxvi di Renn e Schulmann (1992), dei contributi di Besso al lavoro di Einstein.

p. 74 [In effetti, un'ampia gamma… esattamente in questo modo]: Si veda, ad es. l'appendice in Will (1986).

p. 74 [Questa dimostrazione… da Einstein nel 1905]: Documento 23 di ECP-2.

p. 76 [*Una volta dedotto… il principio della relatività*]: Come chiarisce Pais (1982, Sezione 6b.6), Henri Poincaré aveva formulato una versione primitiva del principio della relatività (che chiamò «il principio di relatività») un anno prima di Einstein, ma senza rendersi conto della sua potenzialità.

p. 80 [L'articolo di Einstein…venne pubblicato]: Documento 23 di ECP-2.

CAPITOLO II

p. 85 Commento generale al capitolo II. La maggior parte del materiale di questo capitolo sulla vita di Einstein proviene dalle sue biografie: Pais (1982), Hoffman (1972), Clark (1971), Einstein (1949) e Frank (1947). Per la maggior parte dell'inquadramento storico e delle citazioni del capitolo II, che ho raccolto dalle suddette biografie, non indico le singole fonti. Molto materiale storico nuovo diverrà accessibile grazie alla graduale pubblicazione della raccolta dei volumi degli scritti di Einstein successivi a ECP-1 ed ECP-2.

Il percorso intellettuale seguito da Einstein per passare dalla relatività ristretta alla relatività generale è stato essenzialmente quello descritto in questo capitolo. Tuttavia, per necessità, ho semplificato sostanzialmente il suo percorso, e per chiarezza l'ho descritto usando il linguaggio moderno invece di quello usato da Einstein. Per una rigorosa ricostruzione del percorso intellettuale di Einstein si veda Pais (1982).

p. 85 [Le concezioni dello spazio e del tempo… un'esistenza indipendente]: L'intervento di Hermann Minkowski venne pronunciato all'ottantesima Assemblea degli scienziati naturali tedeschi a Colonia il 21 settembre 1908. Una traduzione in inglese è stata pubblicata in Lorentz, Einstein, Minkowski e Weyl (1923).

p. 92 [L'altra, una particolarità… misurazioni degli astronomi]: La Luna *sembrava* di tanto in tanto accelerare leggermente nel suo moto attorno alla Terra, un effetto che la legge gravitazionale di Newton non poteva spiegare. Nel 1920 G.I. Taylor e H. Jeffreys si resero conto che in realtà la Luna non stava accelerando. Era la rotazione della Terra che rallentava a causa dell'attrazione gravitazionale eserci-

tata dalla Luna sull'acqua degli oceani terrestri. Confrontando il moto costante della Luna con il rallentamento della rotazione terrestre, gli astronomi avevano erroneamente dedotto un'accelerazione della Luna. Si veda Smart (1953).

p. 94 [Una rassegna... *Radioaktivität und Elektronik*]: La traduzione in inglese dell'elegante rassegna di Einstein è riportata come il Documento 47 di ECP-2.

p. 98 [Einstein scoprì la dilatazione gravitazionale del tempo... riportata nella scheda 2.4]: La tesi di Einstein illustrata nella scheda 2.4 venne pubblicata originariamente in Einstein (1911).

p. 101 [Quando iniziò a scrivere il suo articolo nel 1907... *Radioaktivität und Elektronik*]: Documento 47 di ECP-2.

p. 102 [La vita del professore per Einstein... essere brillante]: Si veda Frank (1947), pp. 89-91.

p. 116 [Queste conclusioni... il 25 novembre]: Einstein (1915)

p. 117 [Mentre frugo... (ricerca che... in inglese!)]: Gli articoli non pubblicati di Einstein e i diritti su alcuni di quelli pubblicati sono rimasti bloccati da una disputa legale per vari decenni. L'edizione russa dell'opera omnia è stata realizzata e pubblicata in una fase storica in cui l'Unione Sovietica non aderiva alla Convenzione internazionale sul copyright. L'edizione in inglese, molto più completa, viene attualmente pubblicata con grande gradualità; i primi due volumi sono ECP-1 e ECP-2.

p. 118 Scheda 2.6; osservazione per i lettori che hanno familiarità con la formulazione matematica della relatività generale: la descrizione dell'equazione di campo di Einstein adottata in questa scheda corrisponde al rapporto matematico $R_{tt} = 4\pi G(T_{tt}+T_{xx}+T_{yy}+T_{zz})$ dove R_{tt} è la componente tempo-tempo del tensore di curvatura di Ricci, G è la costante gravitazionale di Newton, T_{tt} è la densità della massa espressa in unità di energia (si veda la scheda 5.2), e $T_{xx}+T_{yy}+T_{zz}$ è la somma delle pressioni principali lungo tre direzioni ortogonali. Si veda p. 406 di MTW. Questa componente «tempo-tempo» dell'equazione di campo di Einstein, quando viene imposta in tutti i quadri di riferimento, garantisce che le altre nove componenti dell'equazione di campo siano soddisfatte.

CAPITOLO III

p. 121 [«Il risultato essenziale di questa ricerca... realtà fisica»]: Einstein (1939).

p. 122 [Nel 1783 John Michell... molto compatte]: Michell (1784). Per le discussioni di questa opera si vedano Gibbons (1979), Schaffer (1979), Israel (1987), e Eisenstaedt (1991).

p. 123 [Tredici anni dopo... e da quelle successive]: Laplace (1796, 1799). Per le discussioni delle pubblicazioni di Laplace sulle stelle scure, si vedano Israel (1987) e Eisenstaedt (1991). Eisenstaedt discute i tentativi, e i loro fallimenti, di verificare osservativamente le previsioni di Michell secondo cui la luce emessa stelle

massive è influenzata dalla loro attrazione gravitazionale e il contributo che questo fallimento potrebbe aver dato all'eliminazione da parte di Laplace delle stelle scure dalla terza edizione del suo libro.

p. 124 [Schwarzschild inviò a Einstein... *all'interno* della stella]: Schwarzschild (1916a, b).

p. 131-132 [Jim Brault... le previsioni di Einstein]: Brault (1962). Per una discussione dettagliata dei testi delle leggi relativistiche generali della gravità di Einstein, si veda Will (1986).

p. 132 [Tuttavia, pochi erano inclini... stelle molto compatte]: Per una illustrazione dettagliata delle prime reazioni alla geometria di Schwarzschild e delle ricerche in questo campo, si veda Eisenstaedt (1982). Un resoconto a più ampio raggio che abbraccia il periodo tra il 1916 e il 1974 si trova in Israel (1987).

p. 135 [Nel 1939 Einstein pubblicò... non potevano esistere]: Einstein (1939).

p. 137 [A sostegno della sua tesi... circonferenza critica]: Schwarzschild (1916b).

p. 139 [«Sono certo... per tale fede»]: Israel (1990).

p. 140 [«Vi è un curioso... pronta a sognare»]: Israel (1990).

CAPITOLO IV

p. 141 Commento generale al capitolo IV. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano ampiamente su (a) conversazioni personali con S. Chandrasekhar sugli ultimi venticinque anni trascorsi, (b) un'intervista registrata con lui (INT-Chandrasekhar), (c) un suo libro su Eddington (Chandrasekhar 1983a), e (d) una sua bella biografia (Wali, 1991). Non cito fonti specifiche su argomenti specifici, eccetto rari casi. Le pubblicazioni scientifiche di Chandrasekhar sulle nane bianche sono raccolte in Chandrasekhar (1989).

p. 142 [Di particolare interesse... *Royal Astronomical Society*]: Fowler (1926).

p. 142 [L'articolo di Fowler... Arthur S. Eddington]: Eddington (1926).

p. 143 (in fondo al testo, a p. 553) Nota 2 del capitolo IV: per una descrizione dettagliata delle difficoltà affrontate da Adams e degli errori che commise nelle misurazioni si veda Greenstein, Oke e Shipman (1985). Vi si trovano anche informazioni sugli studi osservativi di Sirio B fino al 1985.

p. 151 [Chandrasekhar calcolò... della pressione]: Qui mi sono preso una licenza letteraria in due sensi. Primo, Fowler (1926) aveva già calcolato la resistenza alla compressione, quindi Chandrasekhar stava semplicemente controllando i suoi calcoli. Secondo, questo non è il percorso seguito da Chandrasekhar per effettuare i suoi calcoli (INT-Chandrasekhar), sebbene sia matematicamente equivalente a quello vero. Questo è il percorso che mi risulta più facile spiegare; quello vero comportava calcoli sulla pressione degli elettroni espressa come integrale del loro spazio dei momenti.

p. 154 [Finalmente, un anno dopo… pubblicato]: Chandrasekhar (1931).

p. 154 (in fondo al testo, a p. 553) Nota 4 del capitolo IV: Stoner (1930). Questo contributo di Stoner è brevemente citato da Chandrasekhar (1931). Per una descrizione del lavoro di Stoner e di quello di Anderson a esso collegato si veda Israel (1987).

p. 155 [Verso la fine del 1934… in Estonia]: Anderson (1929), Stoner (1930)

p. 156 Figura 4.3. Le masse e le circonferenze delle nane bianche illustrate in questa figura e i risultati di Chandrasekhar relativi alle strutture interne delle nane bianche vennero successivamente pubblicati in Chandrasekhar (1935).

p. 161-162 [«La stella deve continuare a irradiare… in questo modo assurdo!»]: Eddington (1935a). Per ulteriori dettagli sulle tesi capziose di Eddington si veda Eddington (1935b).

p. 163-164 [A Léon Rosenfeld… «Se Eddington ha ragione… affermazioni di Eddington»]: Wali (1991).

p. 164 [a Parigi nel 1939… «Fuori di qui non crediamo a Eddington»]: Wali (1991).

p. 164 [Se la natura non aveva… sotto forma di nana bianca]: Mi è stato detto ciò con tono autorevole da un eminente professore di astronomia del Caltech quando ero un dottorando nel 1958-1962. Ho la forte impressione che all'epoca la maggior parte degli astronomi fosse di questo parere fin dagli anni Quaranta, ma non ne sono sicuro.

p. 165 [«Avevo l'impressione… a qualcos'altro»]: Citato da Wali (1991).

p. 165 [A Eddington… establishment dell'astronomia]: Questa interpretazione del comportamento di Eddington mi è stata suggerita da Werner Israel in una critica a una prima versione di questo capitolo; credo coincida abbastanza con i dati storici.

CAPITOLO V

p. 167 Commento generale al capitolo V. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano in gran parte (a) su mie interviste ai partecipanti agli eventi descritti o con degli scienziati loro colleghi e amici (INT-Baym, INT-Braginsky, INT-Eggen, INT-Fowler, INT-Ginzburg, INT-Greenstein, INT-Harrison, INT-Khalatnikov, INT-Lifshitz, INT-Sandage, INT-Serber, INT-Volkoff, INT-Wheeler), e (b) sulla mia lettura di articoli scientifici scritti dai partecipanti. Per un quadro generale della storia della fisica negli anni Venti e Trenta mi sono basato alquanto su Kevles (1971) e per un quadro storico della fisica sovietica su Medvedev (1978). Ho ricavato utili informazioni e un quadro generale per quanto riguarda Landau da Livanova (1980) e Gamow (1970), per Oppenheimer da Rabi et al. (1969) e Smith e Weiner (1980), e sullo sviluppo delle idee di Wheeler dai suoi appunti di ricerca, Wheeler (1988). In alcuni punti mi sono basato sulle fonti di seguito indicate.

p. 167 [«Al tempo in cui… in errore]: INT-Fowler.

p. 167 [Jesse Greenstein «un genio autoproclamato… altre persone»]: INT-Greenstein e Greenstein (1982).

p. 167-168 [Egli partecipò perfino… le sue stelle di neutroni]: Zwicky (1935).

p. 169 [«Zwicky chiamò Baade… nella stessa stanza»]: INT-Greenstein.

p. 171 [Oggi sappiamo… fattore di 10]: Baade (1952).

p. 171 [Combinando la conoscenza che Baade… dieci milioni]: Questi sono i numeri di Baade e Zwicky così come appaiono in un abstract del loro intervento riportata nella figura 5.2 a parte quel «diecimila e forse dieci milioni» contenuto in un loro articolo più particolareggiato sull'argomento (Baade e Zwicky, 1934b). Il loro errore derivava dall'aver ipotizzato che quando una supernova è al massimo della sua luminosità la circonferenza del suo gas caldo che emette radiazioni fosse compresa tra 1 e 100 circonferenze solari. In realtà, la circonferenza è molto più ampia di così e se si riesamina la loro tesi alla luce di ciò, si ottiene una quantità molto minore di luce ultravioletta e raggi X.

p. 174 [Il neutrone entrò in scena… riteneva Zwicky]: In questo paragrafo e per tutto il capitolo V attribuisco a Zwicky il concetto di stella di neutroni e le sue conseguenze per le supernovae e i raggi cosmici, anche se queste idee sono state pubblicate insieme a Baade. Attribuire a Zwicky la paternità delle idee (e a Baade la comprensione fondamentale delle osservazioni) è frutto di un'ipotesi basata sulle mie discussioni con gli scienziati loro colleghi: INT-Eggen, INT-Fowler, INT-Greenstein, INT-Sandage.

p. 178 Figura 5.2: Baade e Zwicky (1934a). Per qualche giustificazione dei numeri nell'abstract si veda la presentazione più dettagliata in Baade e Zwicky (1934b).

p. 182 [La pubblicazione di Landau… richiesta di aiuto]: Questa interpretazione della pubblicazione di Landau mi è stata spiegata dal suo più caro amico Evgeny Michailovich Lifshitz (INT-Lifshitz).

p. 184 [Rudolph Peierls… «Ho un vivido ricordo … approvava l'articolo»]: Citato in Livanova (1980).

p. 184 [«Tutte le belle ragazze… quelli rimasti»]: Citato in Livanova (1980).

p. 185 [Come ha ricordato… «La scienza russa… Paesi capitalisti»]: Gamow (1970).

p. 185 [Nel 1936 Stalin… vennero distrutte]: I dati sulle incarcerazioni e le uccisioni sotto Stalin sono alquanto incerti. Medvedev (1978) fornisce quelle che forse sono le cifre più attendibili negli anni Settanta. Tuttavia, la glasnost della fine degli anni Ottanta ha reso possibile la diffusione al pubblico di informazioni che le spingono verso l'alto. Le cifre che cito sono una valutazione complessiva effettuata da miei amici russi che hanno studiato la questione in modo abbastanza approfondito alla luce delle rivelazioni della glasnost.

p. 186 [Arthur Eddington… fusione nucleare]: Capitolo XI di Eddington (1926) e i riferimenti ivi contenuti.

p. 187 [Landau in realtà… non valessero nei nuclei atomici]: Landau (1932).

p. 187 [Verso la fine del 1937 Landau preparò un manoscritto]: Il manoscritto di Landau venne pubblicato in Landau (1938). A sua insaputa, il migliore amico di Landau, George Gamow, aveva già pubblicato la stessa idea (Gamow, 1937). Gamow era fuggito dall'Urss nel 1933, poco dopo che sul Paese scese la cortina di ferro di Stalin (si veda Gamow, 1970), ma prima di fuggire aveva appreso l'idea originaria di Landau, precedente a quella dei neutroni, di mantenere calda una stella grazie a un nucleo centrale. Dopo la scoperta del neutrone era naturale che Gamow e Landau (ora non più in contatto tra loro) reinterpretassero indipendentemente il nucleo di Landau del 1931 come un nucleo di neutroni.

p. 189-190 [Landau inviò a Bohr… «La nuova idea di Landau è eccellente e molto promettente»]: Il più intimo amico di Landau, Evgeny Michailovic Lifshitz richiamò la mia attenzione su questa corrispondenza nel 1982 (INT-Lifshitz) e mi spiegò la storia che c'era dietro, così come è qui riportata. Dopo la morte di Lifshitz l'intera corrispondenza, compresa quella tra Kapitsa e Molotov, Kapitsa e Stalin e Kapitsa e Beria, che alla fine portò alla scarcerazione di Landau, è stata pubblicata da Khalatnikov (1988). Gli estratti qui citati sono una mia traduzione dal russo.

p. 190 [nel caso di Landau… documenti del KGB]: Gorelik (1991)

p. 191 [Landau fu fortunato… (la superfluidità era stata scoperta… il valore della scienza sovietica)]: Si veda la nota alle pagine 189-190.

p. 192 [«Be', Robert… un accidente»]: Citato in Royal (1969).

p. 193-194 [Oppie… venticinque dollari al mese]: Serber (1969)

p. 195 [(Nei primi anni Novanta… meccanismo di Landau)]: Si pensa che queste stelle giganti si creino nei sistemi stellari binari in cui una stella implode per diventare una stella di neutroni e poi, molto dopo, con una traiettoria a spirale si infila nel nucleo della sua stella compagna e vi prende dimora. Queste creature bizzarre sono state chiamate «oggetti di Thorne-Żitkow» perché io e Anna Żitkow siamo stati i primi a calcolare le loro strutture nel dettaglio. Si veda Thorne e Żitkow (1977), e inoltre Cannon et al. (1992).

p. 195 [essi inviarono la loro critica … «Una stima di Landau… del Sole»]: Oppenheimer e Serber (1938).

p. 200 [Negli anni Novanta… 3 masse solari]: Shapiro e Teukolsky (1983), Hartle e Sabbadini (1977).

p. 197-201 Scheda 5.4. In questa scheda la maggior parte della mia descrizione della sequenza delle fasi attraverso le quali si è svolta la ricerca è un'ipotesi fondata, che si basa su un'intervista con Volkoff (INT-Volkoff), sugli archivi Tolman (Tolman, 1948) e sulle pubblicazioni dei partecipanti (Oppenheimer e Volkoff, 1939; Tolman, 1939).

p. 200 [Il 19 ottobre… altre formule]: La corrispondenza tra Tolman e Oppenheimer è archiviata in Tolman (1948).

p. 201 [«Ricordo che ero… i suoi calcoli»]: INT-Volkoff.

p. 201 [Doveva esistere… diverse masse solari]: Questa conclusione venne pubblicata in Oppenheimer e Volkoff (1939). I dati analitici di Tolman su cui Oppenheimer e Volkoff basavano le loro stime dell'effetto delle forze nucleari erano stati pubblicati in Tolman (1939).

p. 202 [Nel marzo del 1956 Wheeler… e Oppenheimer e Volkoff]: Volume IV, pp. 33-40 di Wheeler (1988).

p. 204 [Wheeler era meravigliosamente preparato… bomba all'idrogeno]: Per i particolari sulle conoscenze e i precedenti lavori di Wheeler si vedano Wheeler (1979) e Thorne e Zurek (1986).

p. 205-207 Scheda 5.5. L'equazione di stato (il frutto del lavoro di Harrison e Wheeler) venne pubblicata in Harrison, Wakano e Wheeler (1958) e più dettagliatamente in Harrison, Thorne, Wakano e Wheeler (1965). La più recente curva a tratto intero a densità nucleari e superiori (10^{14} grammi per centimetro cubo) è un'approssimazione di varie equazioni di stato moderne riportate da Shapiro e Teukolsky (1983).

p. 205 Figura 5.5: da Harrison, Wakano e Wheeler (1958) e Harrison, Thorne, Wakano e Wheeler (1965). La curva a tratto intero della stella di neutroni è un'approssimazione di vari calcoli moderni riportati da Shapiro e Teukolsky (1983).

p. 212 [Perciò l'articolo scritto insieme a Volkoff… *On Massive Neutron Cores*]: Oppenheimer e Volkoff (1939).

p. 212 [Il suo contributo migliore… *On the Theory and Observation of Highly Collapsed Stars*]: Zwicky (1939).

p. 214 [Isidor I. Rabi… «A me sembra… erano già arrivati»]: Rabi et al. (1969).

CAPITOLO VI

p. 215 Commento generale al capitolo VI. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano in gran parte su: (a) mie interviste con i partecipanti agli eventi descritti o con scienziati loro colleghi e amici (INT-Braginsky, INT-Finkelstein, INT-Fowler, INT-Ginzburg, INT-Harrison, INT-Lifshitz, INT-Misner, INT-Serber, INT-Wheeler, INT-Zel'dovich); (b) la mia partecipazione a una piccola parte della storia; (c) la mia lettura degli articoli scientifici scritti dai partecipanti; (d) le descrizioni dei progetti americani di armi nucleari in Bethe (1982), Rhodes (1986), Teller (1955) e York (1976); (e) le descrizioni dei progetti sovietici di armi nucleari e altri eventi riguardanti l'Urss in Golovin (1973), Medvedev (1978), Ritus (1990), Romanov (1990) e Sakharov (1990); e (f) gli appunti di ricerca di John Wheeler (Wheeler, 1988).

p. 215-216 [Era martedì 10 giugno 1958… «È molto difficile ritenere l'"isolamento gravitazionale" una risposta accettabile»]: Una versione scritta dell'intervento di Wheeler e lo scambio di commenti tra Wheeler e Oppenheimer sono pubblicati in Solvay (1958).

p. 216 [«sembra non si possa sfuggire…[al di sotto di circa 2 Soli]»]: A questa citazione, parafrasata da Harrison, Wakano e Wheeler (1958), ho apportato piccole modifiche per adattarla allo stile e alle convenzioni di questo libro.

p. 218 [«Hartland disprezzava… essere progressisti»]: INT-Serber.

p. 218 [«Oppie era estremamente colto… il più indipendente»]: INT-Fowler.

p. 218 [«Hartland aveva più talento… di tutti noi»]: INT-Serber.

p. 218 [Prima di lanciarsi… rapida disamina del problema]: È una mia ipotesi; non so con certezza che effettuasse una simile rapida disamina, ma conoscendo Oppenheimer e il contenuto degli articoli che ha scritto una volta terminata la ricerca (Oppenheimer e Snyder, 1939), ho il forte sospetto che facesse così.

p. 223 [Esaminando tali formule… sulla superficie e così via]: Oppenheimer e Snyder pubblicarono i risultati della loro ricerca in Oppenheimer e Snyder (1939).

p. 225 [Al Caltech, ad esempio… convinto]: INT-Fowler.

p. 225-226 [Lì Landau… da comprendere per la mente umana]: INT-Lifshitz.

p. 227 [«A livello di personalità… scelsi Breit»]: Wheeler (1979). Questo riferimento è un resoconto autobiografico della ricerca di Wheeler nel campo della fisica nucleare.

p. 227 [Wheeler e Bohr a Princeton… L'articolo di Bohr e Wheeler… «Physical Review»]: Bohr e Wheeler (1939), Wheeler (1979). Bohr e Wheeler non chiamarono il plutonio-239 con il suo nome nel loro articolo, ma Louis A. Turner dedusse direttamente dalla loro figura 4 che esso era un nucleo ideale per alimentare le reazioni a catena, e propose in un famoso memorandum classificato come riservato che venisse usato come combustibile per la bomba atomica (Wheeler, 1985).

p. 228 [Zel'dovich e un suo caro amico… il mondo ne venisse a conoscenza]: INT-Zel'dovich, Zel'dovich e Khariton (1939).

p. 230 [Wheeler era il principale scienziato… Nagasaki]: Per qualche particolare sul ruolo preminente di Wheeler si vedano le pp. 2-5 di Klauder (1972).

p. 230 [«Se le bombe atomiche… di Los Alamos e di Hiroshima»]: Da un discorso di Oppenheimer a Los Alamos, nel Nuovo Messico, il 16 ottobre 1945; si veda p. 172 di Goodchild (1980).

p. 230 [«In un modo molto elementare… che non possono perdere»]: p. 174 di Goodchild (1980).

p. 230 [«Se ripenso… 6 agosto 1943»]: Wheeler (1979).

p. 232 [Mentre questo massiccio sforzo… per il loro programma d'urgenza]: Questi particolari vennero rivelati da Khariton in una conferenza a Mosca, e furono riportati dal «New York Times» di giovedì 14 gennaio 1993, p. A5.

p. 232 [accumulo di scorie… chilometri quadrati di terreno]: Medvedev (1979).

p. 233 [«Basiamo le nostre raccomandazioni… genocidio]: Relazione del 30 ottobre 1949 presentata dal Comitato consultivo generale alla Commissione per l'energia atomica degli Stati Uniti. Riportata in appendice da York (1976).

p. 234 [«Nove su dieci… un colpo di genio]: Bethe (1982).

p. 234 [Come ricorda Wheeler: «Svolgemmo una quantità immensa di calcoli… per far marciare le cose]: INT-Wheeler.

p. 235 [Come ricorda Wheeler: «Stavo per iniziare… sul progetto»]: INT-Wheeler.

p. 235 [«Il programma del 1949… una volta che l'avessimo avuta»]: USAEC (1984) p. 251.

p. 236 [«Mi è stato detto… dispositivi termonucleari»]: INT-Wheeler.

p. 236 [Nella primavera del 1948, quindici mesi prima]: Sembra esserci confusione sulla data di avvio dell'attività di progettazione della bomba-H sovietica. Sakharov (1990) indica la primavera del 1948, ma Ginzburg (1990) indica la primavera del 1947.

p. 236 [Nel giugno del 1948 una seconda équipe]: Questa è la data indicata da Sakharov (1990); Ginzburg (1990) indica il 1947.

p. 236 (in fondo al testo, a p. 555) Nota 3 del capitolo VI: L'ipotesi di Sakharov è delineata in Sakharov (1990). L'affermazione di Zel'dovich è stata fatta verbalmente ad alcuni amici, che me l'hanno poi riferita.

p. 236 [«Il nostro lavoro consiste nel leccare il culo a Zel'dovich»]: La frase mi è stata citata da Vitaly Ginzburg, che era presente. Anche Sakharov era presente; nella versione inglese delle sue memorie (Sakharov, 1990) la citazione è stata riportata nella forma «*Our job is to kiss Zel'dovich anus*». Per un mio parere sul complesso rapporto tra Zel'dovich e Sakharov, si veda Thorne (1991).

p. 237 [«quella troia di Zel'dovich»]: Questa citazione di Landau mi è stata riferita indipendentemente da diversi fisici teorici sovietici.

p. 237 [Sakharov propose… deuterato di lidio (LiD)]: Romanov (1990).

p. 238 [Era ottocento volte… Hiroshima]: I numeri che cito relativamente al rilascio di energia delle varie esplosioni sono tratti da York (1976).

p. 238 [«Sono colpito dalla morte di un grande uomo. Penso alla sua umanità»]: Sakharov (1990).

p. 239 [Nel marzo del 1954… l'idea di Teller e Ulam]: Romanov (1990), Sakharov (1990). Romanov, in un articolo in onore di Sakharov, attribuisce la scoperta a Sakharov e Zel'dovich congiuntamente. Sakharov dice che «a diversi di noi dei Dipartimenti teorici venne [questa idea] quasi allo stesso tempo» e lascia poi l'impressione che spetti a lui stesso il maggior merito, ma dice che «Zel'dovich, Yuri Trutnev e altri hanno dato indubitabilmente contributi significativi».

p. 240-242 [«In molti casi… non concederglielo»]: USAEC (1954).

p. 243 [Teller aveva «avuto il coraggio… meritava considerazione»]: J.A. Wheeler, conversazione telefonica con K.S. Thorne, luglio 1991.

p. 243 [Andrei Sakharov… d'accordo con lui]: Sakharov (1990).

p. 246-247 [A Livermore… produrre dei buchi neri]: La motivazione di questa ricerca, un tentativo di comprendere le supernovae e il loro ruolo di sorgenti di raggi cosmici è descritta da Colgate e Johnson (1960). Colgate e White (1963,

1966) simularono la formazione di supernovae con una massa piccola usando la descrizione della gravità di Newton piuttosto che quella di Einstein. May e White (1965, 1966) simularono la formazione di un buco nero con una massa grande utilizzando la descrizione relativistica generale della gravità di Einstein.

p. 248 [Per sviscerare i particolari… quasi identici a quelli degli americani]: Imshennik e Nadezhin (1964), Podurets (1964).

p. 252 [«Non puoi capire… simultaneamente veri»]: INT-Lifshitz.

p. 252 [Poi, un giorno del 1958… Finkelstein]: Finkelstein (1958).

p. 252 (in fondo al testo a p. 554) Nota 5 del capitolo VI. Si vedano, ad es., le descrizioni nella scheda 31.1 e il capitolo XXXI di MTW.

p. 252-253 [Egli scoprì un po' per caso… implosione stellare]: Per la descrizione di Finkelstein di come si giunse a questa scoperta si veda Finkelstein (1993).

p. 254 [un articolo pubblicato sullo «Scientific American»]: Thorne (1967).

p. 262 [Nel 1964 e nel 1965… implosione stellare]: Harrison, Thorne, Wakano e Wheeler (1965).

p. 264-265 [Lo sperimentò… «A causa… aumentarne l'attrazione gravitazionale»]: Wheeler (1968).

CAPITOLO VII

p. 267 Commento generale al capitolo VII. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano su (a) la mia esperienza personale in quanto partecipante; (b) le mie interviste con gli altri partecipanti (INT-Carter, INT-Chandrasekhar, INT-Detweiler, INT-Eardley, INT-Ellis, INT-Geroch, INT-Ginzburg, INT-Hartle, INT-Ipser, INT-Israel, INT-Misner, INT-Novikov, INT-Penrose, INT-Press, INT-Price, INT-Rees, INT-Sciama, INT-Smarr, INT-Teukolsky, INT-Wald, INT-Wheeler, INT-Zel'dovich); (c) la mia lettura degli articoli scientifici scritti dai partecipanti.

p. 270 [«Vi sono state poche occasioni… fisica quantistica»]: Wheeler (1964b).

p. 275 [«congettura del cerchio»]: Ho pubblicato per la prima volta il concetto della congettura del cerchio in un volume Festschrift in onore di Wheeler (Thorne, 1972) e nella Scheda 32.3 di MTW.

p. 277 [un'idea… fatto scorrere al contrario]: Questa idea era detta da Novikov e Zel'dovich «universo semichiuso». Alla fine presentarono due articoli separati che la descrivevano: Zel'dovich (1962) e Novikov (1963).

p. 278 [«Forse lei *ora* non vuole… ma lo *vorrà*»]: INT-Novikov.

p. 278 [«Yakov Boris'ch… la giornata seguente»]: INT-Novikov.

p. 282-284 [Verificare questa ipotesi… senza alcun campo magnetico]: Le idee principali e i calcoli iniziali di questa ricerca vennero pubblicati in Ginzburg (1964); dettagli matematici più completi vennero elaborati da Ginzburg e un giovane collega, Leonid Moiseevich Ozernoy (Ginzburg e Ozernoy, 1964).

p. 284 [Doroshkevich, Novikov e Zel'dovich… senza alcuna protrusione]: Essi pubblicarono la loro analisi e le loro conclusioni in Doroshkevich, Zel'dovich e Novikov (1965) (gli autori sono elencati secondo l'ordine alfabetico russo).

p. 287 [A Londra Novikov… nulla di simile]: I lettori possono percepire l'atmosfera dell'intervento di Novikov sulle influenti presentazioni che lui e Zel'dovich scrissero brevemente prima della conferenza: Zel'dovich e Novikov (1964, 1965).

p. 287 [Tale versione… in russo]: Doroshkevich, Zel'dovich e Novikov, si veda la nota a p. 161.

p. 288 [Il primo fu Werner Israel… appariranno chiare in seguito]: L'analisi di Israel venne pubblicata in Israel (1967).

p. 290 [Vi arrivò per terzo, dopo Novikov e dopo Israel]: Novikov (1969), de la Cruz, Chase e Israel (1970), Price (1972).

p. 292 [Il meccanismo… Ted Chase]: de la Cruz, Chase e Israel (1970).

p. 292 [Ora il campo permea l'orizzonte… lasciandolo smagnetizzato]: per un'esposizione più completa e particolareggiata dell'interazione dei campi magnetici con un buco nero, si vedano le figure 10, 11 e 36 di Thorne, Price e Macdonald (1986).

p. 294 [Il merito… Mazur]: Per una sintesi e i riferimenti si veda la sezione 6.7 di Carter (1979), la successiva versione completa venne pubblicata in Mazur (1982) e Bunting (1985).

p. 295 [John Graves e Dieter Brill… buco nero dotato di carica]: Graves e Brill (1960) e i riferimenti ivi contenuti.

p. 299 [Roy Kerr aveva… all'esterno di una stella rotante]: Kerr (1963).

p. 299-300 [Nel giro di un anno Carter… Lindquist]: Carter (1966), Boyer e Lindquist (1967).

p. 300 [Carter e altri… possibilmente esistenti]: Carter (1979) e i precedenti riferimenti ivi contenuti.

p. 300 [Le proprietà fisiche… quali erano]: Carter (1968).

p. 304 [Werner Israel dimostrò… non ci si riuscirebbe]: Israel (1986).

p. 304 [Nel 1969 Roger Penrose… scoperta meravigliosa]: Penrose (1969).

p. 305 [Ted Newman… Robert Torrence]: Newman et al. (1965).

p. 306 [Nell'autunno del 1971 Bill Press… del buco nero stesso]: Press (1971).

p. 307 [Il vincitore fu Saul Teukolsky]: Teukolsky (1972).

p. 307 [Teukolsky ricorda vividamente… «A volte, quando uno si mette a giocare con la matematica… insieme i termini giusti]: INT-Teukolsky.

p. 308 [Lo stesso Teukolsky… pulsazioni dei buchi neri]: Press e Teukolsky (1973).

p. 309 [*The Mathematical Theory of Black Holes*]: Chandrasekhar (1983b).

CAPITOLO VIII

p. 311 Commento generale al capitolo VIII. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano su (a) la mia esperienza personale in quanto partecipante; (b) le mie interviste con gli altri partecipanti (INT-Giacconi, INT-Novikov, INT-Rees, INT-Van Allen, INT-Zel'dovich); (c) la mia lettura degli articoli scientifici scritti dai partecipanti; (d) i seguenti resoconti pubblicati della storia: Friedman (1972), Giacconi e Gursky (1974), Hirsch (1979) e Uhuru (1981).

p. 312 [«Un simile oggetto… un'altra stella»]: Wheeler, (1964a).

p. 312 [Se siete Zel'dovich… dell'implosione stellare]: Ventidue anni dopo, nel 1986, Zel'dovich mi manifestò il suo rimpianto per non essere stato di mentalità più aperta riguardo a cosa accada all'interno dei buchi neri; INT-Zel'dovich.

p. 318 [Insieme, Guseinov e Zel'dovich… nei cataloghi]: Zel'dovich e Guseinov (1965).

p. 318 [Esaminando… otto candidati al ruolo di buco nero]: Trimble e Thorne (1969).

p. 318 [Fortunatamente il suo brainstorming… Ithaca]: Salpeter (1964), Zel'dovich (1964).

p. 319 [Zel'dovich e Novikov… sulla ricaduta del gas]: Novikov e Zel'dovich (1966).

p. 321 [«il razzo ritornò a Terra… nell'impatto»]: Friedman (1972).

p. 323 [annunciarono la loro scoperta… *avessero previsto*]: Giacconi, Gursky, Paolini e Rossi (1962).

p. 330 [(suggerito nel 1972 da Rashid Sunyaev… équipe di Zel'dovich)]: Sunyaev (1972).

CAPITOLO IX

p. 335 Commento generale al capitolo IX. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano su (a) la mia esperienza personale in quanto partecipante marginale dal 1962 in poi; (b) le mie interviste con diversi partecipanti (INT-Ginzburg, INT-Greenstein, INT-Rees, INT-Zel'dovich); (c) la mia lettura degli articoli scientifici scritti dai partecipanti; (d) i seguenti resoconti pubblicati e non pubblicati della storia: Hey (1973), Greenstein (1982), Kellermann e Sheets (1983), Struve e Zebergs (1962) e Sullivan (1982, 1984).

p. 335-336 [Le onde radio cosmiche… nel 1932 da Karl Jansky]: Jansky (1932).

p. 336 [Le due eccezioni… da Jansky]: Whipple e Greenstein (1937).

p. 337 [«Non incontrai mai… non un solo astronomo»]: INT-Greenstein.

p. 337 [Talmente poco interessati… sigla W9GFZ]: Per la descrizione storica del suo lavoro fatta da Reber, si veda Reber (1958).

p. 339 [Nel 1940, dopo aver effettuato... e la spedì]: Reber (1940).

p. 340 [Greenstein descrive Reber come «l'inventore americano ideale... milioni di dollari»]: INT-Greenstein.

p. 340 [«L'Università non voleva spendere... dannatamente indipendente»]: INT-Greenstein.

p. 343 [La prima tappa fondamentale... le radiosorgenti dovevano trovarsi]: Bolton, Stanley e Slee (1949).

p. 344 [Quando Baade sviluppò... due galassie in collisione l'una con l'altra]: Baade e Minkowsky (1954).

p. 345 [R.C. Jennison e M.K. Das Gupta... estremi opposti delle «galassie in collisione»]: Jennison e Das Gupta (1953).

p. 347 [Greenstein organizzò... il 5 e 6 gennaio 1954]: Gli atti di questa conferenza sono stati pubblicati a Washington (1954).

p. 348 [Il blocco mentale... Maarten Schmidt]: Schmidt (1963).

p. 349-350 [Greenstein si voltò... 37% della velocità della luce]: Greenstein (1963).

p. 350 [Harlan Smith... appena un mese]: Smith (1965).

p. 352 [Sulla base delle feconde idee... riempiono lo spazio interstellare]: Alfvén e Herlofson (1950), Kiepenheuer (1950), Ginzburg (1951). Per un'esposizione della storia di questo lavoro si veda Ginzburg (1984).

p. 353 [Geoffrey Burbidge... con un'efficienza del 100%]: Burbidge (1959).

p. 355 [Per favorire il dialogo... Dallas, nel Texas]: Gli atti di questa conferenza sono pubblicati in Robinson, Schild e Schucking (1965).

p. 355-356 [Così, quando Kerr si accinse a parlare... acquistò slancio]: Questa descrizione si basa sui miei vividi ricordi della conferenza.

p. 356 [Nel 1971 ciò suggerì... che alimentava i quasar]: Rees (1971).

p. 357 [Malcolm Longair... onde elettromagnetiche]: Longair, Ryle e Scheuer (1973).

p. 359 [L'idea che dei buchi neri giganti... Edwin Salpeter e Yakov Borisovich Zel'dovich]: Salpeter (1964), Zel'dovich (1964).

p. 359 [Una descrizione più completa... da Donald Lynden-Bell]: Lynden-Bell (1969).

p. 360 [Come fa un buco nero... la risposta nel 1975]: Bardeen e Petterson (1975).

p. 361 [Quanto poteva essere forte il vortice spaziale... quasi al massimo tasso possibile]: Bardeen (1970).

p. 361 [Primo, Blandford e Rees si resero conto]: Blandford e Rees (1974).

p. 363 [Secondo... fece osservare Lynden-Bell]: Lynden-Bell (1978).

p. 363 [Terzo, Blandford comprese]: Blandford (1976).

p. 363-364 [Il quarto metodo... *processo Blandford-Znajek*]: Blandford e Znajek (1977).

p. 366 [Se i quasar e le radiogalassie sono alimentati dallo stesso tipo di motore

a buchi neri]: Per delle panoramiche più dettagliate dello stato attuale delle nostre conoscenze sui quasar, le radiogalassie, i getti e il ruolo dei buchi neri e dei loro dischi di accrezione in quanto motori centrali che li alimentano, si veda, ad es., Begelman, Blandford e Rees (1984) e Blandford (1987).

p. 368 [La prova della presenza… lungi dall'essere certa]: Si veda, ad es., Phinney (1989).

CAPITOLO X

p. 371 Commento generale al capitolo X. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano su (a) la mia esperienza personale in quanto partecipante; (b) le mie interviste con diversi partecipanti (INT-Braginsky, INT-Drever, INT-Forward, INT-Grischchuk, INT-Weber, INT-Weiss); (c) la mia lettura degli articoli scientifici scritti dai partecipanti. Per delle panoramiche più tecniche sulle onde gravitazionali e sui tentativi di rilevarle si vedano, ad es., Blair (1991) e Thorne (1987).

p. 380 [Mentre Weber pubblicava la sua invenzione]: Weber (1953).

p. 381 [Dalla fine del 1957… verso le onde in arrivo]: I frutti del lavoro di Weber vennero pubblicati in Weber (1960, 1961).

p. 381-382 [Il suo unico punto di riferimento… circonferenza prossima a quella critica]: Lettera inviatami da Weber, datata 1° ottobre 1992; Weber non pubblicò questa tesi all'epoca. Il collega di Weber, Freeman Dyson, fu il primo a dimostrare che è probabile che la natura produca esplosioni di onde gravitazionali vicine alle frequenze scelte da Weber (Dyson, 1963).

p. 383 [Tuttavia, agli inizi degli anni Settanta… una realtà]: Weber annunciò la prova osservativa delle onde gravitazionali in Weber (1969). Le conseguenti attività sperimentali e controversie sul fatto che le onde fossero state effettivamente rilevate o meno sono documentate, ad es., in deSabbata e Weber (1977) e negli articoli ivi citati. Per uno studio sociologico della controversia si veda Collins (1975, 1981).

p. 383 [un corso estivo intensivo di due mesi]: Le lezioni tenute alla scuola estiva, compresa quella di Weber, vennero pubblicate in DeWitt e DeWitt (1964).

p. 386 [Durante il nostro incontro nel 1969… un limite fondamentale, definitivo]: Questa versione iniziale dell'ammonimento di Braginsky venne pubblicata in Braginsky (1967).

p. 387 [Tuttavia, nel 1976… *principio di indeterminazione*]: Gli ammonimenti, illustrati con maggiore chiarezza, vennero pubblicati in Braginsky (1977) e Giffard (1976), e il fatto che il limite abbia origine dal principio di indeterminazione venne spiegato in Thorne, Drever, Caves, Zimmermann e Sandberg (1978).

p. 389 [La risposta era all'incirca 10^{-21}]: Si veda, ad es., la trascrizione parziale della discussione a margine di una conferenza del 1978 in Epstein e Clark (1979).

p. 390 [Entrambi trovammo la risposta... strade molto diverse]: Braginsky, Vorontsov e Khalili (1978); Thorne, Drever, Caves, Zimmermann e Sandberg (1978).

p. 393 [In linea di principio sarebbe possibile ampliare la larghezza della banda delle sbarre]: Michelson e Taber (1984).

p. 397 [Gli interferometri per la rilevazione delle onde gravitazionali... come fecero Robert Forward e i suoi colleghi]: Gertsenshtein e Pustovoit (1962), Weber (1964), Weiss (1972), Moss, Miller e Forward (1971).

p. 398 [e Drever aveva apportato... alla loro progettazione]: Si veda, ad es., Drever (1991) e i riferimenti ivi contenuti.

p. 402 [indirizzò la maggior parte delle attività di ricerca della sua équipe]: Si veda Braginsky e Khalili (1992).

p. 407 [Un elemento chiave per il successo... o LIGO]: Per una panoramica dei programmi del LIGO si veda Abramovici et al. (1992).

CAPITOLO XI

p. 413 Commento generale al capitolo XI. Gli aspetti storici (di rilevanza abbastanza minore) di questo capitolo si basano su (a) la mia esperienza personale in quanto partecipante; (b) le mie interviste con due altri partecipanti (INT-Damour, INT-Wald); (c) la mia lettura degli articoli scientifici scritti dai partecipanti; (d) la mia esperienza di studente in un corso sui paradigmi e le rivoluzioni scientifiche tenuto da Thomas Kuhn alla Princeton University nel 1965.

p. 417 [*La struttura delle rivoluzioni scientifiche*]: Kuhn (1962).

p. 419 [Questa libertà conferisce potere]: Richard Feynman, uno dei più grandi fisici del nostro secolo, ha ben descritto il potere che deriva dall'avere a disposizione diversi paradigmi nel suo gradevole libretto *The Character of Physical Law* (*La legge fisica*, Bollati Boringhieri, 1971), (Feynman, 1965). Si noti, tuttavia, che egli non usa mai il termine «paradigma», e sospetto che non abbia mai letto l'opera di Thomas Kuhn. Kuhn ha descritto il modo di operare delle persone come Feynman; Feynman agiva esattamente in questo modo.

p. 419 [Questo è il motivo per cui i fisici... spaziotempo piatto]: Il paradigma dello spaziotempo piatto venne elaborato in modo più o meno indipendente da diverse persone; è noto, tecnicamente, come «una teoria di campo in una formulazione della relatività generale basata su uno spaziotempo piatto». Per una panoramica sulla storia e i concetti a esso relativi, si vedano i seguenti passaggi in MTW: sezioni 7.1 e 18.1; schede 7.1, 17.2 e 18.1; esercizio 7.3. Per una sua elegante generalizzazione, che chiarisce il suo rapporto con il paradigma dello spaziotempo curvo, si veda Grishchuk, Petrov e Popova (1984).

p. 421 [Nel 1971 Hanni e Ruffini... Jeff Cohen]: Cohen e Wald (1971), Hanni e Ruffini (1973).

p. 423 [Cinque anni dopo Roger Blandford… alimentare dei getti]: Blandford e Znajek (1977).

p. 425 [Durante il 1977 e il 1978 Znajek… interpretazione figurata]: Znajek (1978), Damour (1978).

p. 426 [*Black Holes: The Membrane Paradigm*]: Thorne, Price, e Macdonald (1986). Si veda anche Price e Thorne (1988).

CAPITOLO XII

p. 429 Commento generale al capitolo XII. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano su (a) la mia esperienza personale in quanto partecipante; (b) le mie interviste con altri partecipanti (INT-DeWitt, INT-Eardley, INT-Hartle, INT-Hawking, INT-Israel, INT-Penrose, INT-Unruh, INT-Wald, INT-Wheeler, INT-Zel'dovich); (c) la mia lettura degli articoli scientifici scritti dai partecipanti; (d) i seguenti resoconti pubblicati della storia: Bekenstein (1980), Hawking (1988), Israel (1987).

p. 429 [L'Idea balenò… con tale rapidità]: Questa e la successiva descrizione di come Hawking arrivò alla sua idea sono tratte da INT-Hawking e Hawking (1988). Hawking descrisse i particolari e le conseguenze della sua idea, così come descritti a grandi linee nel primo paragrafo di questo capitolo, *I buchi neri crescono*, in Hawking (1971b, 1972, 1973).

p. 430 [sotto la guida di Roger Penrose]: Penrose (1965).

p. 432-433 Scheda 12.1: Hawking (1972, 1973).

p. 434 [Stephen Hawking non era il primo… Werner Israel]: INT-Israel, INT-Penrose, INT-Hawking.

p. 434-435 Scheda 12.2: Hawking (1972, 1973).

p. 435 [nella sbalorditiva scoperta fatta da Penrose nel 1964]: Penrose (1965).

p. 436 [Hawking e James Hartle… gravità di altri corpi]: Hawking e Hartle (1972).

p. 440 [Demetrios Christodoulou… equazioni della termodinamica]: Christodoulou (1970).

p. 442 [Bekenstein non ne era convinto]: Bekenstein descrive il fatto e la controversia con Hawking che ne seguì in Bekenstein (1980). Egli ha descritto la sua congettura sull'entropia dei buchi neri e i relativi fondamenti in Bekenstein (1972, 1973).

p. 444 [Bardeen, Carter e Hawking… *leggi della meccanica dei buchi neri*]: Bardeen, Carter e Hawking (1973).

p. 445 [scuola estiva di Les Houches]: Gli atti della scuola estiva del 1972 vennero pubblicati in DeWitt e DeWitt (1973).

p. 445 [Zel'dovich mi aveva portato a Mosca]: Charles Misner e John Wheeler mi accompagnarono nella visita a Mosca del giugno 1971, ma non erano presenti

con me nell'appartamento di Zel'dovich durante la discussione descritta nei paragrafi seguenti.

p. 446 [Zel'dovich, con gli occhi vispi...]: Ho ricostruito la seguente conversazione a memoria, e l'ho tradotta in un linguaggio meno tecnico di quello che eravamo soliti usare.

p. 451 [Ma Zel'dovich non se ne dimenticò... l'articolo venne pubblicato]: Zel'dovich (1971).

p. 453 [Starobinsky descrisse la congettura di Zel'dovich... emette effettivamente radiazioni]: Zel'dovich e Starobinsky (1971).

p. 453 [Poi arrivò la bomba]: Hawking racconta, in Hawking (1988), come giunse alla scoperta «bomba» secondo cui tutti i buchi neri emettono radiazioni. Egli descrisse la sua scoperta e le relative implicazioni in Hawking (1974, 1975, 1976).

p. 455 [Questo e il requisito di una perfetta coerenza... quasi completamente]: Si veda, ad es., Wald (1977).

p. 456 (in fondo al testo a p. 559) Nota 11 del capitolo XII: Wald (1977).

p. 457 [Forse la raffigurazione... particelle anziché sulle onde]: Hawking (1988).

p. 460 [Gradualmente... nuova concezione illustrata nella figura 12.3]: Capitolo VIII di Thorne, Price e Mcdonald (1986) e i riferimenti ivi contenuti.

p. 463-464 Scheda 12.5: Davies (1975), Unruh (1976), Unruh e Wald (1982, 1984).

p. 465 [una prova molto astratta... nel 1977]: Gibbons e Hawking (1977).

p. 465 [La durata totale della sua vita... Don Page]: Page (1976).

p. 465 [I calcoli approfonditi di Hawking... piccoli buchi neri]: Ad.es, Hawking (1971a); Novikov, Polnarev, Starobinsky e Zel'dovich (1979).

p. 466 [L'assenza di raggi gamma in eccesso... equazione di stato estremamente debole]: Novikov, Polnarev, Starobinsky e Zel'dovich (1979).

CAPITOLO XIII

p. 467 Commento generale al capitolo XIII. Gli aspetti storici di questo capitolo si basano su (a) la mia esperienza personale (più come osservatore che come partecipante); (b) le mie interviste con i partecipanti (INT-Belinsky, INT-DeWitt, INT-Geroch, INT-Khalatnikov, INT-Lifshitz, INT-MacCallum, INT-Misner, INT-Penrose, INT-Sciama, INT-Wheeler); (c) la mia lettura degli articoli scientifici scritti dai partecipanti.

p. 467 [John Archibald Wheeler ci ha insegnato... dal di fuori dell'orizzonte]: Harrison, Wakano e Wheeler (1958); Wheeler (1960).

p. 467 [Wheeler restò convinto... Santo Graal]: Wheeler (1964a, b); Harrison, Thorne, Wakano e Wheeler (1965).

p. 468 [J. Robert Oppenheimer e Hartland Snyder]: Oppenheimer e Snyder (1939).

p. 468 [Forse… Oppenheimer, la sua scarsa propensione alla speculazione]: Si vedano le ultime pagine del capitolo V.

p. 469 [La singolarità prevista dai calcoli di Oppenheimer e Snyder]: La singolarità qui descritta è quella che si trova nel vuoto all'esterno della stella in fase di implosione, e poiché la regione del vuoto è descritta dalla soluzione di Schwarzschild alle equazioni di Einstein, questa singolarità è spesso detta *singolarità della geometria di Schwarzschild*. Essa è analizzata quantitativamente, ad es., nel capitolo XXXII di MTW.

p. 470 Figura 13.1: Ibid.

p. 471 [Un gruppo… cessava di essere valida]: Harrison, Thorne, Wakano e Wheeler (1965).

p. 471-472 [Un secondo gruppo… Markovich Khalatnikov e Evgeny Michailovich Lifshitz… non era credibile]: Questo punto di vista e i calcoli che spinsero Khalatnikov e Lifshitz ad adottarlo vennero pubblicati in Khalatnikov e Lifshitz (1962).

p. 473 [Khalatnikov e Lifshitz… *piccole perturbazioni.*]: Ibid.

p. 474 [*Teoria dei campi*]: Landau e Lifshitz (1962)

p. 476 Figura 13.4: Per gli studenti dell'équipe di Wheeler, in cui era stata effettuata la ricerca di Graves-Brill, all'inizio degli anni Sessanta era ovvio che doveva esistere una soluzione delle equazioni di Einstein del tipo qui raffigurato. Tuttavia, sono venuto a sapere da una conversazione con Penrose che i ricercatori della maggior parte delle altre équipe ne rimasero inconsapevoli fino alla fine degli anni Sessanta. Era difficile costruire esplicitamente queste soluzioni, e noi dell'équipe di Wheeler non ci provammo e non pubblicammo niente sull'argomento. A pubblicare per la prima volta questa idea e a cercare una soluzione esplicita, per quanto ne so, è stato Novikov (1966).

p. 477 [Hans Reissner e Gunnar Nordström… Dieter Brill e John Graves]: Graves e Brill (1960) e i riferimenti ivi contenuti.

p. 478 [Roger Penrose proveniva da una famiglia…]: Questa presentazione biografica di Penrose si basa in gran parte su INT-Penrose e INT-Sciama.

p. 479 [La seduzione cominciò nel 1952]: Ibid.

p. 480 [Un giorno di fine autunno del 1964,…]: INT-Penrose; Penrose (1989).

p. 481 [«La mia conversazione con Robinson… mentre attraversavo quella strada»]: Penrose (1989).

p. 481 [un breve articolo per la rivista «Physical Review Letters»]: Penrose (1965).

p. 484 [*metodi globali*]: I metodi globali vennero codificati in quello che è divenuto un classico da Hawking e Ellis (1973).

p. 484 [Hawking e Penrose nel 1970 hanno dimostrato… «big crunch»]: Hawking e Penrose (1970).

p. 485 [Lifshitz, pur essendo ebreo… 1976]: Dalle mie conversazioni private avute con Lifshitz negli anni Settanta.

p. 485 [Khalatnikov aveva due svantaggi… venire a Londra]: lettera scrittami da Khalatnikov, 18 giugno 1990.

p. 485 [Mentre parlava nella sala conferenze gremita… Penrose, essi affermavano, probabilmente si sbagliava]: Dai miei ricordi del convegno e di quanto ne seguì.

p. 486 [«Per piacere… mandalo alla "Physical Review Letters"»]: Khalatnikov e Lifshitz (1970). Si veda anche Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz (1970, 1982).

p. 487 [Nascosi il manoscritto… venne pubblicato]: Ibid.

p. 489 [Lev Davidovich Landau… grandi scoperte nel campo della fisica]: INT-Lifshitz, Livanova (1980).

p. 490 [Curiosamente, le tecniche topologiche… Pimenov]: L'ho appreso da Penrose.

p. 490 [Nel periodo tra il 1950 e il 1959 Aleksandrov… quelle che non possono]: Aleksandrov (1955, 1959).

p. 490 [ripreso e portato ulteriormente avanti da Pimenov]: Pimenov (1968).

p. 492 [(dovuta a Khalatnikov e Lifshitz)… «instabile rispetto alle piccole perturbazioni»]: Lifshitz e Khalatnikov (1960, 1963).

p. 492 [Il tipo di soluzione di Reissner-Nordström… grande universo]: ad es., Novikov (1966).

p. 492-493 [è instabile rispetto… molti fisici diversi]: Nel linguaggio tecnico, è l'*orizzonte interno di Cauchy* della soluzione di Reissner-Nordström a essere instabile. La congettura si trova in Penrose (1968); le prove si trovano in Chandrasekhar e Hartle (1982) e nei riferimenti anteriori ivi citati.

p. 493 [Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz… (ossia il tipo… buchi neri)]: Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz (1970, 1982).

p. 493 [Charles Misner… (*mixmaster*)]: Misner (1969).

p. 495 [Ma quand'è che si impone la gravità quantistica… o meno]: Per primo lo ha dedotto Wheeler (1960) basandosi sulle sue idee precedenti riguardo alle fluttuazioni del vuoto della geometria dello spaziotempo (Wheeler, 1955, 1957).

p. 495 (in fondo al testo a p. 560) Nota 2 del capitolo XIII: Il *tempo di Planck-Wheeler* è stato introdotto da Wheeler, che ne ha dedotto il significato fisico (1955, 1957).

p. 495 [La gravità quantistica cambia poi radicalmente… una schiuma aleatoria, probabilistica]: Ciò è stato suggerito per primo da Wheeler (1960) ed è stato espresso in termini più quantitativi da quella che oggi è detta «equazione di Wheeler-DeWitt». Si veda, ad es., l'esposizione in Hawking (1987).

p. 496 [John Wheeler… *schiuma quantistica*]: Wheeler (1957, 1960).

p. 497 [Risposte chiare… DeWitt]: Si veda, ad es., Hawking (1987, 1988).

p. 497-498 [Le forze di marea… e gradualmente scompaiono]: Doroshkevich e Novikov (1978) hanno dimostrato che la singolarità invecchia; Poisson e Israel (1990) e Ori (1991) hanno dedotto i particolari dell'invecchiamento attraverso modelli semplificati; e Ori (1992) ha dimostrato sperimentalmente che tali mo-

delli sono guide valide per il comportamento delle singolarità all'interno dei buchi neri reali.

p. 499-500 [Alcune implosioni… potrebbero in effetti dare luogo a delle singolarità nude]: Per i particolari relativi a queste simulazioni si veda Shapiro e Teukolsky (1991).

p. 500 [Appena quattro mesi dopo… una piccola singolarità nuda]: La prova di Hawking venne pubblicata in Hawking (1992a).

CAPITOLO XIV

p. 503 Commento generale al capitolo XIV; gli aspetti astorici di questo capitolo si basano quasi interamente sulle mie esperienze come partecipante.

p. 505 [I cunicoli temporali non sono il frutto dell'immaginazione… nel 1916]: Ludwig Flamm (1916) scoprì che, scegliendo una topologia opportuna, la soluzione di Schwarzschild (1916a) dell'equazione di Einstein descrive un cunicolo temporale vuoto e sferico.

p. 507 Figura 14.2: Kruskal (1960).

p. 510 [Procedevamo lentamente… «American Journal of Physics»]: Morris e Thorne (1988).

p. 511 [(il tema del libro di Hawking e Ellis)]: Hawking e Ellis (1973).

p. 511 [*le fluttuazioni del vuoto in prossimità di un buco nero sono esotiche*]: Hawking dedusse ciò solo molto indirettamente e in un modo un po' incerto dalla sua scoperta dell'evaporazione dei buchi neri. Sei anni dopo ne fornì una solida conferma Candelas (1980).

p. 512 [La risposta non è arrivata facilmente… rendendole in tal modo esotiche]: Si veda Wald e Yurtsever (1991) e gli altri riferimenti ivi citati.

p. 514 [Nel 1955 John Wheeler… schiuma quantistica]: Wheeler (1955, 1957, 1960).

p. 516-517 [Nel 1966 Robert Geroch… viaggiare sia indietro che in avanti nel tempo]: Geroch (1967). Friedman, Papastamatiou, Parker e Zhang (1988) hanno fornito un esempio esplicito di creazione di un cunicolo temporale del tipo previsto dal teorema di Geroch.

p. 519 (in fondo al testo, alle pp. 560-561) Nota 7 del capitolo XIV: van Stockum (1937), Gödel (19499, Tipler (1976).

p. 528 [Il nostro articolo venne pubblicato]: Morris, Thorne e Yurtsever (1988).

p. 529 [ipotizzammo ciò nel nostro articolo]: Morris, Thorne e Yurtsever (1988).

p. 529 (in fondo al testo, al p. 561) Nota 11 del capitolo XIV: Friedman e Morris (1991).

p. 532 [Echeverria e Klinkhammer… di queste traiettorie ne esistono *due*]: Echeverria, Klinkhammer e Thorne (1991).

p. 534-535 Scheda 14.2: Echeverria, Klinkhammer e Thorne (1991).

p. 534 [Robert Forward… scoprì una terza traiettoria]: Forward (1992).

p. 536 [ma non sembrano esservi… paradossi irrisolvibili]: Per un'esposizione accurata e abbastanza completa dal punto di vista tecnico del tema dei paradossi quando si dispone di una macchina del tempo costituita da un cunicolo temporale, si veda Friedman et al. (1990).

p. 536 [La rivista «California»… Monte Palomar]: Hall (1989)

p. 538 [Nonostante il notevole aiuto… Konkowski]: Hiscock e Konkowski (1982).

p. 540 [un calcolo simile effettuato da Valery Frolov… nostri risultati]: Frolov (1991).

p. 541 [facemmo in modo di modificare… venisse pubblicato]: Kim e Thorne (1991).

p. 542 [*la congettura della protezione della cronologia*]: Hawking (1992b).

p. 542 (in fondo al testo, al p. 561) Nota 13 del capitolo XIV: Gott (1991).

p. 542 [*Non* voglio partecipare a questa scommessa… le leggi della gravità quantistica]: Per una descrizione alquanto tecnica dei motivi del mio scetticismo, nel 1993, circa le macchine del tempo e una dettagliata panoramica delle ricerche in questo campo aggiornata alla primavera del 1993, si veda Thorne (1993).

BIBLIOGRAFIA

INTERVISTE REGISTRATE

Baym, Gordon; 5 settembre 1985, Champaign/Urbana, Illinois.

Belinsky, Vladimir; 27 marzo 1986, Mosca, Urss.

Braginsky, Vladimir Borisovich; 20 dicembre 1982, Mosca, Urss; 27 marzo 1986, Mosca, Urss.

Carter, Brandon; 6 luglio 1983, Padova, Italia.

Chandrasekhar, Subrahmanyan; 3 aprile 1982, Chicago, Illinois.

Damour, Thibault; 26 luglio 1986, Cargese, Corsica.

Detweiler, Steven; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.

DeWitt, Bryce; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.

Drever, Ronald W.P.; 21 giugno 1982, Les Houches, Francia.

Eardley, Doug M.; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.

Eggen, Olin; 13 settembre 1985, Pasadena, California.

Ellis, George; dicembre1980, Baltimore, Maryland.

Finkelstein, David; 8 luglio 1983, Padova, Italia.

Forward, Robert; 31 agosto 1982, Oxnard, California.

Fowler, William A.; 6 agosto 1985, Pasadena, California.

Geroch, Robert; 2 aprile 1982, Chicago, Illinois.

Giacconi, Riccardo; 29 aprile 1983, Greenbelt, Maryland.

Ginzburg, Vitaly Lazarevich; dicembre 1982, Mosca, Urss; 3 febbraio 1989, Pasadena, California.

Greenstein, Jesse L.; 9 agosto 1985, Pasadena, California.

Grishchuk, Leonid P.; 26 marzo1986, Mosca, Urss.

Harrison, B. Kent; 5 settembre1985, Provo, Utah.

Hartle, James B.; dicembre1980, Baltimore, Maryland; 2 aprile 1982, Chicago, Illinois.

Hawking, Stephen W.; luglio 1980, Cambridge, Inghilterra (non registrata).

Ipser, James R.; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.

Israel, Werner, giugno 1982, Les Houches, Francia.
Khalatnikov, Isaac Markovich; 27 marzo 1986, Mosca, Urss.
Lifshitz, Evgeny Michailovich; dicembre 1982, Mosca, Urss.
MacCallum, Malcolm; 30 agosto 1982, Santa Barbara, California.
Misner, Charles W.; 10 May 1981, Pasadena, California.
Novikov, Igor Dmitrievich; dicembre 1982 e 28 marzo 1986, Mosca, Urss.
Penrose, Roger; 7 luglio 1983, Padova, Italia.
Press, William H.; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.
Price, Richard; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.
Rees, Martin; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.
Sandage, Allan; 13 settembre 1985, Baltimore, Maryland.
Sciama, Dennis; 8 luglio 1983, Padova, Italia.
Serber, Robert; 5 agosto 1985, New York City.
Smarr, Larry; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.
Teukolsky, Saul A.; 27 gennaio 1985, Ithaca, New York.
Unruh, William; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.
Van Allen, James; 29 aprile 1973, Greenbelt, Maryland.
Volkoff, George; 11 settembre 1985, Vancouver, British Columbia.
Wald, Robert M.; dicembre 1980, Baltimore, Maryland; 2 aprile 1982, Chicago, Illinois.
Weber, Joseph; 20 luglio 1982, College Park, Maryland.
Weiss, Rainer; 7 luglio 1983, Padova, Italia.
Wheeler, John; dicembre 1980, Baltimore, Maryland.
Zel'dovich, Yakov Borisovich; 17 dicembre 1982, Mosca, Urss; 22 e 27 marzo 1986, Mosca, Urss.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

A. Abramovici, A. Althouse, W. E. Drever, R.W.P. Gürsel, Y. Kawamura, S. Raab, F.J. Shoemaker, D. Sievers, L. Spero, R.E. Thorne, K.S. Vogt, R.E. Weiss, R. Whitcomb, S.E. e Zucker, M.E., *LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, «Science», 256, 325-333, (1992).

A.D. Aleksandrov, *The Space-Time of the Theory of Relativity*, Helvetica Physica Acta, Supplementi, 4, 4, (1955).

A.D. Aleksandrov, *The Philosophical Implication and Significance of the Theory of Relativity*, «Voprosy Filosofii», n. 1, 67, (1959).

H. Alfvén e N. Herlofson, *Cosmic Radiation and Radio Stars*, «Physica Review», 78, 738, (1950).

W. Anderson, *Uber die Grenzdichte der Materie und der Energie*, «Zeitschrift für Physik», 56, 851, (1929).

W. Baade, *Report of the Commission on Extragalactic Nebulae*, Transactions of the International Astronomical Union, 8, 597, (1952).

W. Baade e R. Minkowski, *Identification of the Radio Sources in Cassiopeia, Cygnus A, and Puppis*, «Astrophysical Journal», 119, 206, (1954).

W. Baade e F. Zwicky, *Supernovae and Cosmic Rays*, «Physical Review», 45, 138, (1934a).

W. Baade e F. Zwicky, *On Super-Novae*, «Proceedings of the National Academy of Sciences», 20, 254, (1934b).

J.M. Bardeen, *Kerr Metric Black Holes*, «Nature», 226, 64, (1970).

J.M. Bardeen, B. Carter e S. W. Hawking, *The Four Laws of Black Hole Mechanics*, «Communications in Mathematical Physics», 31, 161, (1973).

J.M. Bardeen e J.A. Petterson, *The Lense – Thirring Effect and Accretion Disks around Kerr Black Holes*, «Astrophysical Journal Letters» 195, L65, (1975).

M.C. Begelman, R. D. Blandford, e M. J. Rees, *Theory of Extragalactic Radio Sources*, «Reviews of Modern Physics», 56, 255, (1984).

J.D. Bekenstein, *Black Holes and the Second Law*, Lettere al Nuovo Cimento, 4, 737, (1972).

J.D. Bekenstein, *Black Holes and Entropy*, «Physical Review D», 7, 2333, (1973).

J.D. Bekenstein, *Black Hole Thermodynamics*, «Physics Today», 24 gennaio 1980.

V.A. Belinsky, I.M. Khalatnikov e E. M. Lifshitz, *Oscillatory Approach to a Singular Point in the Relativistic Cosmology*, «Advances in Physics», 19, 525, (1970).

V.A. Belinsky, I.M. Khalatnikov, e E. M. Lifshitz, *Solution of the Einstein Equations with a Time Singularity*, «Advances in Physics», 31, 639, (1982).

H.A. Bethe, *Comments on the History of the H-Bomb*, «Los Alamos Science», 43, autunno 1982.

H.A. Bethe, *Sakharov's H-Bomb*, «Bulletin of the Atomic Scientists», ottobre 1990. Ristampato in Drell e Kapitsa, 1991, p. 149.

D. Blair, (a cura di), *The Detection of Gravitational Waves*, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1991.

R.D. Blandford, *Accretion Disc Electrodynamics – A Model for Double Radio Sources*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 176, 465, (1976).

R.D. Blandford, *Astrophysical Black Holes*, in *300 Year of Gravitation*, a cura di S.W. Hawking e W. Israel, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1987, p. 277.

R.D. Blandford e M. Rees, *A Twin-Exhaust Model for Double Radio Sources*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 169, 395, (1974).

R.D. Blandford e R.L. Znajek, *Electromagnetic Extraction of Energy from Kerr Black Holes*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 179, 433, (1977).

N. Bohr, e J.A. Wheeler, *The Mechanism of Nuclear Fission*, «Physical Review», 56, 426, (1939).

J.G. Bolton, G.J. Stanley, e O.B. Slee, *Positions of Three Discrete Sources of Galactic Radio-Frequency Radiation*, «Nature», 164, 101, (1949).

R.H. Boyer e R.W. Lindquist, *Maximal Analytic Extension of the Kerr Metric*, «Journal of Mathematical Physics», 8, 265, (1967).

V.B. Braginsky, *Classical and Quantum Restrictions on the Detection of Weak Disturbances of a Macroscopic Oscillator*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 53, 1434, (1967). Trad. inglese in «Soviet Physics – JETP», 26, 831, (1968).

V.B. Braginsky, *The Detection of Gravitational Waves and Quantum Non-disturbtive Measurements*, in *Topics in Theoretical and Experimental Gravitation Physics*, a cura di V. de Sabbata e J. Weber, Plenum, Londra, 1977, p. 105.

V.B. Braginsky, e F. Ya. Khalili, *Quantum Measurements*, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1992.

V.B. Braginsky, Yu. I. Vorontsov, e F. Ya. Khalili, *Optimal Quantum Measurements in Detectors of Gravitational Radiation*, «Pis'ma v Redaktsiyu Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 27, 296, (1978). Traduzione inglese in «JETP Letters», 27, 276, (1978).

V. B. Braginsky, Yu. L. Vorontsov, e K. S.Thorne, *Quantum Nondemolition Measurements*, «Science», 209, 547, (1980).

J.W. Brault, *The Gravitational Redshift in the Solar Spectrum*, tesi di dottorato non pubblicata, Princeton University, 1962; reperibile presso University Microfilms, Ann Arbor, Michigan.

A.C. Brown, a cura di, *DROPSHOT: The American Plan for World War III against Russia in 1957*, Dial Press/James Wade, New York, 1978.

G. Bunting, *Proof of the Uniqueness Conjecture for Black Holes*, tesi Ph.D. non pubblicata, Department of Mathematics, University of New England, Annidale, N.S.W. Australia, 1983.

G.R. Burbidge, *The Theoretical Explanation of Radio Emission*, in *Paris Symposium on Radio Astronomy*, a cura di R.N. Bracewell, Stanford University Press, Stanford, California, 1959.

P. Candelas, *Vacuum Polarization in Schwarzschild Spacetime*, «Physical Review D», 21, 2185, (1980).

R.C. Cannon, P.P. Eggleton, A.N. Zytkow e P. Podsiadlowski, *The Structure and Evolution of Thorne – Zytkow Objects*, «Astrophysical Journal», 386, 206-214, (1992).

B. Carter, *Complete Analytic Extension of the Symmetry Axis of Kerr's Solution of Einstein's Equations*, «Physical Review», 141, 1242, (1966).

B. Carter, *Global Structure of the Kerr Family of Gravitational Fields*, «Physical Review», 174, 1559, 1968.

B. Carter, *The General Theory of the Mechanical, Electromagnetic and Thermodynamic Properties of Black Holes*, in *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*, a cura di S.W. Hawking e W. Israel, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1979, p. 294.

C.M. Caves, K.S. Thorne, R.W.P. Drever, V.D. Sandberg e M. Zimmermann, *On the Measurement of a Weak Classical Force Coupled to a Quantum-Mechanical Oscillator. I. Issues of Principle*, «Reviews of Modern Physics», 52, 341, (1980).

S. Chandrasekhar, *The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs*, «Astrophysical Journal», 74, 81, (1931).

S. Chandrasekhar, *The Highly Collapsed Configurations of a Stellar Mass (Second Paper)*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 95, 207, (1935).

S. Chandrasekhar, *Eddingtom The Most Distinguished Astrophysicist of His Time*, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1983a.

S. Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes*, Oxford University Press, New York, 1983b.

S. Chandrasekhar, *Selected Papers of S. Chandrasekhar. Volume I: Stellar Structure and Stellar Atmospheres*, University of Chicago Press, Chicago, 1989.

S. Chandrasekhar e J. M. Hartle, *On Crossing the Cauchy Horizon of a Reissner-Nordström Black Hole*, «Proceedings of the Royal Society of London», A384, 301, (1982).

D. Christodoulou, *Reversible and Irreversible Transformations in Black-Hole Physics*, «Physical Review» Letters, 25, 1596, (1970).

R.W. Clark, *Einstein: The Life and Times*, World Publishing Co., New York, 1971.

J.M. Cohen, e R.M. Wald, *Point Charge in the Vicinity of a Schwarzschild Black Hole*, «Journal of Mathematical Physics», 12, 1845, (1971).

S.A. Colgate e M.H. Johnson, *Hydrodynamic Origin of Cosmic Rays*, «Physical Review» Letters, 5, 235, (1960).

S.A. Colgate e R.H. White, *Dynamics of a Supernova Explosion*, «Bulletin of the American Physical Society», 8, 306, (1963).

S.A. Colgate e R.H. White, *The Hydrodynamic Behavior of Supernova Explosions*, «Astrophysical Journal», 143, 626, (1966).

H.M. Collins, *The Seven Sexes: A Study in the Sociology of a Phenomenon, or the Replication of Experiments in Physics*, «Sociology», 9, 205, (1975).

H.M. Collins, *Son of Seven Sexes: The Social Destruction of a Physical Phenomenon*, «Social Studies of Science», SAGE, Londra e Beverly Hills, 11, 33, (1981).

T. Damour, *Black-Hole Eddy Currents*, «Physical Review D», 18, 3598, (1978).

P.C.W. Davies, *Scalar Particle Production in Schwarzschild and Rindler Metrics*, Journal of Physics A, 8, 609, (1975).

V. de la Cruz, J.E. Chase e W. Israel, *Gravitational Collapse with Asymmetries*, «Physical Review» Letters, 24, 423, (1970).

V. de Sabbata e J.Weber, a cura di, *Topics in Theoretical and Experimental Gravitation Physics*, Plenum, New York, 1977.

C. DeWitt e B.S. DeWitt, a cura di, *Relativity, Groups, and Topology*, Gordon and Breach, New York, 1964.

C. DeWitt e B.S. DeWitt, a cura di, *Black Holes*, Gordon and Breach, New York,1973.

A.D. Doroshkevich e I.D. Novikov, *Space-Time and Physical Fields in Black Holes*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 74, 1978, 3. Traduzione inglese in «Soviet Physics – JETP», 47, 1, (1978).

A.D. Doroshkevich, Ya. B. Zel'dovich e I. D. Novikov, *Gravitational Collapse of Nonsymmetric and Rotating Masses*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 49, 170, (1965). Traduzione inglese in «Soviet Physics – JETP», 22, 122 (1966).

S. Drell e S. Kapitsa, a cura di, *Sakharov Remembered A Tribute by Friends and Colleague*s, American Institute of Physics, New York, 1991.

R.W.P. Drever, *Fabry-Perot Cavity Gravity-Wave Detectors*, in *The Detection of Gravitational Waves*, a cura di D. Blair, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1991, p. 306.

F.J. Dyson, *Gravitational Machines* in *The Search for Extraterrestrial Life*, a cura di A.G.W. Cameron, W.A. Benjamin, New York, 1963, p. 115.

F. Echeverria, G. Klinkhammer, e K.S. Thorne, *Billiard Balls in Worm-hole Spacetimes with Closed Timelike Curves. I. Classical Theory*, «Physical Review D», 44, 1077, (1991).

ECP-1: *A. Einstein, The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 1: The Early Years, 1879-1902*, a cura di John Stachel, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987. Traduzione inglese di Anna Beck nel volume allegato dallo stesso titolo.

ECP-2: *A. Einstein, The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909*, a cura di John Stachel, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1989. Traduzione inglese di Anna Beck nel volume allegato dallo stesso titolo.

A.S. Eddington, *The Internal Constitution of the Stars*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1926.

A.S. Eddington, *Relativistic Degeneracy*, «Observatory», 58, 37, (1935a).

A.S. Eddington, *On Relativistic Degeneracy*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 95, 194, (1935b).

A. Einstein, *On the Influence of Gravity on the Propagation of Light*, «Annalen der Physik«, 35, 898, (1911).

A. Einstein, *The Field Equations for Gravitation*, «Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin», Klasse fur Mathematik, Physik, und Technik, 1915, 844, (1915).

A. Einstein, *On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses*, «Annals of Mathematics», 40, 922, (1939).

A. Einstein, *Autobiographical Notes*, in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, a cura di Paul A. Schilpp, Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois, 1949.

A. Einstein e M. Marić, *Albert Einstein/Mileva Marić: The Love Letters*, a cura di Jurgen Renn and Robert Schulman, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1992.

J. Eisenstaedt, *Histoire et Singularités de la Solution de Schwarzschild*, Archive for History of Exact Sciences, 27, 157, (1982).

J. Eisenstaedt, *De l'Influence de la Gravitation sur la Propagation de la Lumière en Théorie Newtonienne. L'Archeologie des Trous Noirs*, «Archive for History of Exact Sciences», 42, 315, (1991).

R. Epstein, e J.P.A. Clark, *Discussion Session II: Sources of Gravitational Radiation*, in *Sources of Gravitational Radiation*, a cura di L. Smarr, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1979, p. 477.

R.P. Feynman, *The Character of Physical Law*, British Broadcasting Corporation, Londra; edizione paperback: MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1965.

D. Finkelstein, *Past – Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle*, «Physical Review», 110, 965, (1958).

D. Finkelstein, *Misner, Kinks, and Black Holes*, in *Directions in General Relativity. Volume 1: Papers in Honor of Charles Misner*, a cura di B.L. Hu, M.P. Ryan Jr., and C.V. Vishveshwara, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1993, p. 99.

L. Flamm, *Beiträge zur Einsteinschen Gravitationstheorie*, «Physik Zeitschrift», 17, 448, (1916).

R.L. Forward, *Timemaster*, Tor Books, New York, 1992.

R.H. Fowler, *On Dense Matter*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 87, 1926, 114.

P. Frank, *Einstein: His Life and Times*, Alfred A. Knopf, New York, 1947.

H. Friedman, *Rocket Astronomy*, «Annals of the New York Academy of Sciences», 198, 267, (1972).

J. Friedman, e M.S. Morris, *The Cauchy Problem for the Scalar Wave Equation Is Well Defined on a Class of Spacetimes with Closed Timelike Curves*, «Physical Review Letters», 66, 401, (1991).

J. Friedman, M.S. Morris, I.D. Novikov, F. Echeverria, G. Klinkhammer, K.S. Thorne e U. Yurtsever, *Cauchy Problem in Spacetimes with Closed Timelike Curves*, «Physical Review D», 42, 1915, (1990).

J. Friedman, N. Papastamatiou, L. Parker, e H. Zhang, *Non-orientable Foam and an Effective Planck Mass for Point-like Fermions*, «Nuclear Physics», B309, 1988, 533; appendice.

V.P. Frolov, *Vacuum Polarization in a Locally Static Multiply Connected Spacetime and a Time-Machine Problem*, «Physical Review D», 43, 3878, (1991).

G. Gamow, *Structure of Atomic Nuclei and Nuclear Transformations*, Clarendon Press, Oxford, Inghilterra, 1937, pp. 234-238.

G. Gamow, *My World Line*, Viking Press, New York, 1970.

R.P. Geroch, *Topology in General Relativity*, «Journal of Mathematical Physics», 8, 1967, 782.

M. E. Gertsenshtein, e V.I. Pustovoit, *On the Detection of Low-Frequency Gravitational Waves*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 43, 605, (1962). Traduzione inglese in «Soviet Physics – JETP», 16, 433, (1963).

R. Giacconi, e H. Gursky, a cura di, *X-Ray Astronomy*, Reidel, Dordrecht, 1974.

R.Giacconi, H. Gursky, F. R. Paolini, e B. B. Rossi, *Evidence for X-Rays from Sources Outside the Solar System*, «Physical Review Letters», 9, 439, (1962).

G. Gibbons, *The Man Who Invented Black Holes*, «New Scientist», 28, 29 giugno 1979, 1101.

G.W. Gibbons e S.W. Hawking, *Action Integrals and Partition Functions in Quantum Gravity*, «Physical Review D», 15, 2752, (1977).

R. Giffard, *Ultimate Sensitivity Limit of a Resonant Gravitational Wave Antenna Using a Linear Motion Detector*, «Physical Review D», 14, 2478, (1976).

V.L. Ginzburg, *Cosmic Rays as the Source of Galactic Radio Waves*, «Doklady Akademii Nauk» SSSR, 76, 377, (1951).

V.L. Ginzburg, *The Magnetic Fields of Collapsing Masses and the Nature of Superstars*, «Doklady Akademii Nauk» SSSR, 156, (1964). 43. Traduzione inglese in «Soviet Physics – Doklady», 9, 329, (1964).

V.L. Ginzburg, *Some Remarks on the History of the Development of Radio Astronomy*, in *The Early Years of Radio Astronomy*, a cura di W.J. Sullivan, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1984.

V.L. Ginzburg, *Private communication to K.S. Thorne*, 1990.

V.L. Ginzburg e L.M. Ozernoy, *On Gravitational Collapse of Magnetic Stars*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 47, 1030, (1964). Traduzione inglese in «Soviet Physics – JETP», 20, 689, (1965).

J. Gleick, *Chaos: Making a New Science*, Viking/Penguin, New York, 1987.

K. Godei, *An Example of a New Type of Cosmological Solution of Einstein's Field Equations of Gravitation*, «Reviews of Modern Physics», 21, 447, (1949).

I.N. Golovin, I.V. Kurchatov, *Atomizdat*, Mosca, 1973, seconda edizione. Una traduzionie inglese della prima edizione, meno completa, era stata pubblicata con il seguente titolo: *Academician Igor Kurchatov*, Mir Publishers, Mosca, 1969; e inoltre, Selbstverlag Press, Bloomington, Indiana, 1968.

P. Goodchild, J. Robert Oppenheimer, *Shatterer of Worlds*, British Broadcasting Corporation, Londra, 1980.

G.E. Gorelik, *"My Anti-Soviet Activities..." One Year in the Life of L.D. Landau*, Priroda, novembre 1991, p. 95; in russo.

J.R. Gott, *Closed Timelike Curves Produced by Pairs of Moving Cosmic Strings: Exact Solutions*, «Physical Review Letters», 66, 1126, (1991).

J.C. Graves e D.R. Brill, *Oscillitory Character of the Reissner-Nordström Metric for an Ideal Charged Wormhole*, «Physical Review», 120, 1507, (1960).

J.L. Greenstein, *Red-shift of the Unusual Radio Source: 3C48*, «Nature», 197, 1041, (1963).

J.L. Greenstein, *Oral history intervista di Rachel Prud'homme*, febbraio e Marzo 1982, Archives, California Institute of Technology, 1982.

J.L. Greenstein, J.B. Oke e H. Shipman, *On the Redshift of Sirius B*, «Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society», 26, 279, (1985).

L.P. Grishchuk, A.N. Petrov, e A.D. Popova, *Exact Theory of the Einstein Gravitational Field in an Arbitrary Background Space-Time*, «Communications in Mathematical Physics», 94, 379, (1984).

S.S. Hall, *The Man Who Invented Time Travel: The Astounding World of Kip Thorne*, California, Ottobre 1989, p. 68.

R.S. Hanni e R. Ruffini, *Lines of Force of a Point Charge Near a Schwarzschild Black Hole*, «Physical Review D», 8, 3259, (1973).

B.K. Harrison, K.S. Thorne, M. Wakano e J.A. Wheeler, *Gravitation Theory and Gravitational Collapse*, University of Chicago Press, Chicago, 1965.

B. K.Harrison, M. Wakano e J.A. Wheeler, *Matter-Energy at High Density: End Point of Thermonuclear Evolution*, in *La Structure et l'Evolution de l'Univers*, Onzième Conseil de Physique Solvay, Stoops, Bruxelles, 1958, p. 124.

J.B. Hartle e A.G. Sabbadini, *The Equation of State and Bounds on the Mass of Nonrotating Neutron Stars*, «Astrophysical Journal», 213, 831, 1977.

S.W. Hawking, *Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 152, 75, (1971a).

S.W. Hawking, *Gravitational Radiation from Colliding Black Holes*, «Physical Review Letters», 26, 1344, (1971b).

S.W. Hawking, *Black Holes in General Relativity,* «Communications in Mathematical Physics», 25, 152, (1972).

S.W. Hawking, *The Event Horizon*, in *Black Holes*, a cura di C. DeWitt and B.S. DeWitt, Gordon and Breach, New York, 1973, p. 1.

S.W. Hawking, *Black Hole Explosions?* «Nature», 248, 30, (1974).

S.W. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, «Communications in Mathematical Physics», 43, 199, (1975).

S.W. Hawking, *Black Holes and Thermodynamics*, «Physical Review D», 13, 191, (1976).

S.W. Hawking, *Quantum Cosmology*, in *300 Years of Gravitation*, a cura di S.W. Hawking e W. Israel, Cambridge University Press, Cambridge, 1987, p. 631.

S.W. Hawking, *A Brief History of Time*, Bantam Books, Toronto, New York, 1988.

S.W. Hawking, *The Chronology Protection Conjecture*, «Physical Review D», 46, 603, (1992a).

S.W. Hawking, *Evaporation of Two-Dimensional Black Holes*, «Physical Review Letters», 69, 406, (1992b).

S.W. Hawking e G.F.R. Ellis, *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1973.

S.W. Hawking e J.B. Hartle, *Energy and Angular Momentum Flow into a Black Hole*, «Communications in Mathematical Physics», 27, 283, (1972).

S.W. Hawking e R. Penrose, *The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology*, «Proceedings of the Royal Society of London», A314, 529, (1970).

J.S. Hey, *The Evolution of Radio Astronomy*, Neale Watson Academic Publications, Inc., New York, 1973.

R.F. Hirsh, *Science, Technology, and Public Policy: The Case of X-Ray Astronomy,* 1959 to 1972, tesi non pubblicata per il Ph.D., University of Wisconsin-Madison; consultabile presso University Microfilms, Ann Arbor, Michigan, 1979.

W.A. Hiscock e D.A. Konkowski, *Quantum Vacuum Energy in Taub-NUT (Newman-Unti-Tamburino)-Type Cosmologies*, «Physical Review D», 6, 1225, (1982).

B. Hoffman, in collaborazione con H. Dukas, *Albert Einstein: Creator and Rebel*, Viking, New York, 1972.

V.S. Imshennik e D.K. Nadezhin, *Gas Dynamical Model of a Type II Supernova Outburst*, «Astronomicheskii Zhurnal», 41, 829, (1964). Traduzione inglese in «Soviet Astronomy – AJ», 8, 664, (1965).

W. Israel, *Event Horizons in Static Vacuum Spacetimes*, «Physical Review», 164, 1776, (1967).

W. Israel, *Third Law of Black Hole Dynamics – A Formulation and Proof*, «Physical Review Letters», 57, 397, (1986).

W. Israel, *Dark Stars: The Evolution of an Idea*, in *300 Years of Gravitation*, a cura di S.W. Hawking and W. Israel, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1987, p. 199.

W. Israel, lettera a S. Thorne, del 28 maggio 1990, in cui commenta la bozza provvisoria del presente libro.

K. Jansky, *Directional Studies of Atmospherics at High Frequencies*, «Proceedings of the Institute of Radio Engineers», 20, 1920, (1932).

R.C. Jennison e M.K. Das Gupta, *Fine Structure of the Extra-terrestrial Radio Source Cygnus 1*, «Nature», 172, 996, (1953).

K. Kellermann e B. Sheets, *Serendipitous Discoveries in Radio Astronomy, National Radio Astronomy Observatory*, Green Bank, West Virginia, 1983.

R.P. Kerr, *Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics*, «Physical Review Letters», 11, 237, (1963).

D.J. Kevles, *The Physicists, Random House*, New York, 1971.

I.M. Khalatnikov, a cura di, *Vospominaniya o L.D. Landau*, Nauka, Mosca, 1988. Traduzione inglese: *Landau, the Physicist and the Man: Recollections of L.D. Landau*, Pergamon Press, Oxford, England, 1989.

I.M. Khalatnikov e E.M. Lifshitz, *The General Cosmological Solution of the Gravitational Equations with a Singularity in Time*, «Physical Review Letters», 24, 76 (1970).

K.O. Kiepenheuer, *Cosmic Rays as the Source of General Galactic Radio Emission*, «Physical Review», 79, 738 (1950).

S.-W. Kim e K.S. Thorne, *Do Vacuum Fluctuations Prevent the Creation of Closed Timelike Curves?*, «Physical Review D», 43, 3939 (1991).

J.R. Klauder, a cura di, *Magic without Magia John Archibald Wheeler*, W.H. Freeman, San Francisco, 1972.

M.D. Kruskal, *Minimal Extension of the Schwarzschild Metric*, «Physical Review», 119, 1743 (1960).

T. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1962.

L.D. Landau, *On the Theory of Stars*, «Physikalische Zeitschrift Sowjetunion», 1, 285, (1932).

L.D. Landau, *Origin of Stellar Energy*, «Nature», 141, 333, (1938).

L.D. Landau, e M. Lifshitz, *Teoriya Polya*, Gosudarstvennoye Izdatel'stvo Fiziko-Matematicheskoi Literaturi, Mosca, 1962, sezione 108. Traduzione: *The Classical Theory of Fields*, Pergamon Press, Oxford, Inghilterra, 1962, section 110.

P.S. Laplace, *Exposition du Système du Monde. Volume II: Des Mouvements Réels des Corps Celestes*, Parigi, 1796. Pubblicato in inglese con il titolo: *The System of the World*, W. Flint, Londra, 1809.

P.S. Laplace, *Proof of the Theorem, that the Attractive Force of a Heavenly Body Could Be So Large, that Light Could Not Flow Out of It*, Allgemeine Geographische Ephemeriden, verfasset von Einer Gesellschaft Gelehrten. 8vo Weimer, IV, Bd I St., 1799. Traduzione inglese in Appendice A di Hawking e Ellis, 1973.

E.M. Lifshitz e I.M. Khalatnikov, *On the Singularities of Cosmological Solutions of the Gravitational Equations. I.*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 39, 149, (1960). Trad. inglese in «Soviet Physics – JETP», 12, 108 e 558, (1961).

E.M. Lifshitz e I.M. Khalatnikov, *Investigations in Relativistic Cosmology*, «Advances in Physics», 12, 185, (1963).

A. Livanova, *Landau: A Great Physicist and Teacher*, Pergamon Press, Oxford, Inghilterra, 1980.

M.S. Longair, M. Ryle e P.A.G. Scheuer, *Models of Extended Radio Sources*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 164, 243, (1973).

H.A. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski e H. Weyl, *The Principle of Relativity A Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity*, Dover, New York, 1923.

D. Lynden-Bell, *Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars*, «Nature», 223, 690, (1969).

D. Lynden-Bell, *Gravity Power*, «Physica Scripta», 17, 185, (1978).

P. Mazur, *Proof of Uniqueness of the Kerr-Newman Black Hole Solution*, «Journal of Physics A», 15, 5173, (1982).

M.M. May e R.H. White, *Hydrodynamical Calculation of General Relativistic Collapse*, «Bulletin of the American Physical Society», 10, 15, (1965).

M.M. May e R.H. White, *Hydrodynamic Calculations of General Relativistic Collapse*, «Physical Review», 141, 1232, (1966).

Z.A. Medvedev, *Soviet Science*, W. W. Norton, New York, 1978.

Z.A. Medvedev, *Nuclear Disaster in the Urals*, W. W. Norton, New York, 1979.

J. Micheli, *On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of Their Light, in Case Such a Diminution Should Be Found to Take Place in Any of Them, and Such Other Data Should Be Procured from Observations, as Would Be Further Necessary for That Purpose*, in Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 74, 35, (1784); presentato alla Royal Society il 27 novembre 1783.

P.F. Michelson e R.C. Taber, *Can a Resonant-Mass Gravitational-Wave Detector Have Wideband Sensitivity?*, «Physical Review D», 29, 2149, (1984).

C.W. Misner, *Mixmaster Universe*, «Physical Review Letters», 22, 1071 (1969).

C.W. Misner, K.S. Thorne e J.A. Wheeler, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco, 1973.

S. Mitton e M. Ryle, *High Resolution Observations of Cygnus A at 2.7 GHz and 5 GHz*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 146, 221, (1969).

M.S. Morris e K.S. Thorne, *Wormholes in Spacetime and Their Use for Interstellar Travel: A Tool for Teaching General Relativity*, «American Journal of Physics», 56, 395 (1988).

M.S. Morris, K.S. Thorne e U. Yurtsever, *Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition*, «Physical Review Letters», 61, 1446, (1988).

G.E. Moss, L.R, Miller e R.L. Forward, *Photon Noise Limited Laser Transducer for Gravitational Antenna*, «Applied Optics», 10, 2495, (1971).

MTW: Misner, Thorne, Wheeler, *Gravitation*, 1973.

E.T. Newman, E. Couch, K. Chinnapared, A. Exton, A. Prakash e R. Torrence, *Metric of a Rotating, Charged Mass*, «Journal of Mathematical Physics», 6, 918, (1965).

I. D. Novikov, *The Evolution of the Semi-Closed World*, «Astronomicheskii Zhurnal», 40, 772, (1963). Traduzione inglese in «Soviet Astronomy – AJ», 7, 587, (1964).

I.D. Novikov, *Change of Relativistic Collapse into Anticollapse and Kinematics of a Charged Sphere*, Pis'ma v Redaktsiyu, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 3, 223 (1966). Traduzione inglese in «JETP Letters», 3, 142, (1966).

I.D., Novikov, *Metric Perturbations When Crossing the Schwarzschild Sphere*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 57, 949, (1969). Traduzione inglese in «Soviet Physics – JETP», 30, 518 (1970).

I.D. Novikov, A.G. Polnarev, A.A. Starobinsky e Ya. B. Zel'dovich, *Primordial Black Holes*, «Astronomy and Astrophysics», 80, 104, (1979).

I.D. Novikov e Ya. B. Zel'dovich, *Physics of Relativistic Collapse*, «Supplemento al Nuovo Cimento», 4, 810, (1966); Addendo 2.

J.R. Oppenheimer e R. Serber, *On the Stability of Stellar Neutron Cores*, «Physical Review», 54, 608, (1938).

J. R. Oppenheimer e H. Snyder, On Continued Gravitational Contraction," «Physical Review», 56, 455, (1939).

J.R. Oppenheimer e G. Volkoff, *On Massive Neutron Cores*, «Physical Review», 54, 540, (1939).

A. Ori, *The Inner Structure of a Charged Black Hole: An Exact Mass Inflation Solution*, «Physical Review Letters», 67, 789, (1991).

A. Ori, *Structure of the Singularity Inside a Realistic Rotating Black Hole*, «Physical Review Letters», 68, 2117, (1992).

D.N. Page, *Particle Emission Rates from a Black Hole*, «Physical Review D», 13, 198, (1976) e 14, 3260, (1976).

D.N. Page e S.W. Hawking, *Gamma Rays from Primordial Black Holes*, «Astrophysical Journal», 206, 1, (1975).

H. Pagels, *The Cosmic Code*, Simon and Schuster, New York, 1982.

A. Pais, *Subtle Is the Lord ..., The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, Inghilterra, 1982.

R. Penrose, *Gravitational Collapse and Spacetime Singularities*, «Physical Review Letters», 14, 57, (1965).

R. Penrose, *The Structure of Spacetime*, in *Battette Rencontres: 1967 Leetures in Mathematics and Physics*, a cura di C.M. DeWitt e J.A. Wheeler, Benjamin, New York, 1968, p. 565.

R. Penrose, *Gravitational Collapse: The Role of General Relativity*, «Rivista Nuovo Cimento», 1, 252, (1969).

R. Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, New York, 1989, pp. 419-421.

Phinney, E.S., *Manifestations of a Massive Black Hole in the Galactic Center*, in «The Center of the Galaxy: Proceedings of IAU Symposium 136», a cura di M. Morris, Reidel, Dordrecht, Paesi Bassi, 1989, p. 543.

R.I. Pimenov, *Prostranstva Kinimaticheskovo Tipa [Seminars in Mathematics]*, Vol. 6 V.A. Steklov Mathematical Institute, Leningrado, 1968. Traduzione inglese: *Kinematic Spaces*, Consultants Bureau, New York, 1970.

M.A. Podurets, *The Collapse of a Star with Back Pressure Taken Into Account*, «Doklady Akademii Nauk», 154, 300, (1964). Traduzione inglese in «Soviet Physics – Doklady» 9, 1, (1964).

E. Poisson e W. Israel, *Internal Structure of Black Holes*, «Physical Review D», 41, 1796, (1990).

W.H. Press, *Long Wave Trains of Gravitational Waves from a Vibrating Black Hole*, «Astrophysical Journal Letters», 170, 105, (1971).

W.H. Press e S.A. Teukolsky, *Perturbations of a Rotating Black Hole. II. Dynamical Stability of the Kerr Metric*, «Astrophysical Journal», 185, 649, (1973).

R.H. Price, *Nonspherical Perturbations of Relativistic Gravitational Collapse*, «Physical Review D», 5, 2419 e 2439 (1972).

R.H. Price e K.S. Thorne, *The Membrane Paradigm for Black Holes*, «Scientific American», 258 n. 4, 69, (1988).

I.I. Rabi, R. Serber, V. F. Weisskopf, A. Pais e G.T. Seaborg, *Oppenheimer*, Scribners, New York, 1969.

G. Reber, *Cosmic Static*, «Astrophysical Journal», 91, 621, (1940).

G. Reber, *Cosmic Static*, «Astrophysical Journal», 100, 279, (1944).

G. Reber, *Early Radio Astronomy at Wheaton, Illinois*, «Proceedings of the Institute of Radio Engineers», 46, 15, (1958).

M. Rees, *New Interpretation of Extragalactic Radio Sources*, «Nature», 229, 312 e 510 (1971).

J. Renn e R. Schulman, *Introduction to Albert Einstein/Mileva Marić: The Love Letters*, a cura di Jürgen Renn and Robert Schulman, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1992.

R. Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb*, Simon and Schuster, New York, 1986.

V.I. Ritus, *If Not I, Then Who?*, Priroda, agosto 1990. Traduzione inglese in Drell e Kapitsa, a cura di, 1991.

I. Robinson, A. Schild e E.L. Schucking, a cura di, *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse*, University of Chicago Press, Chicago, 1965.

Yu. A. Romanov, *The Father of the Soviet Hydrogen Bomb*, Priroda, agosto 1990. Traduzione inglese in Drell e Kapitsa, a cura di, 1991.

D. Royal, *The Story of J. Robert Oppenheimer*, St. Martin's Press, New York, 1969.

C. Sagan, *Contact*, Simon and Schuster, New York.

Sakharov, A. (1990). *Memoirs*, Alfred A. Knopf, New York, 1985.

E. E. Salpeter, *Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects*, «Astrophysical Journal», 140, 796, (1964).

S. Schaffer, *John Micheli and Black Holes*, «Journal for the History of Astronomy», 10, 42, (1979).

M. Schmidt, *3C273: A Star-like Object with Large Red-shift*, «Nature», 197, 1040 (1963).

K. Schwarzschild, *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*, «Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse fur Mathematik, Physik, und Technik», 189, 1916, (1916a).

K. Schwarzschild, *Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie*, «Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse fur Mathematik, Physik, und Technik», 1916, 424, (1916b).

C. Seelig, *Albert Einstein – A Documentary Biography*, Staples Press, Londra, 1956, p. 104.

R. Serber, *The Early Years*, in Rabi et al. 1969; pubblicato inoltre in «Physics Today», Ottobre 1967, p. 35.

S.L. Shapiro e S. A. Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars*, Wiley, New York, 1983.

S.L. Shapiro e S. A. Teukolsky, *Formation of Naked Singularities – The Violation of Cosmic Censorship*, «Physical Review Letters», 66, 994, (1991).

W.M. Smart, *Celestial Mechanics*, Longmans, Green and Co., Londra, 1953, sezione 19.03.

A.K. Smith e C. Weiner, *Robert Oppenheimer: Letters and Recollections*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1980.

H.J. Smith, *Light Variations of 3C273*, in *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse*, a cura di I. Robinson, A. Schild, and E.L. Schucking, University of Chicago Press, Chicago, 1965, p. 221.

Solvay, Onzième Conseil de Physique Solvay, *La Structure et l'Evolution de l'Univers*, Editions R. Stoops, Bruxelles, 1958.

E.C. Stoner, *The Equilibrium of Dense Stars*, «Philosophical Magazine», 9, 944, (1930).

O. Struve e V. Zebergs, *Astronomy of the 20th Centur*, Macmillan, New York, 1962.

W. J. Sullivan, a cura di, *Classics in Radio Astronomy*, Reidel, Dordrecht, Paesi Bassi, 1982.

W. J. Sullivan, a cura di, *The Early Years of Radio Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge, Inghilterra, 1984.

R.A. Sunyaev, *Variability of X Rays from Black Holes with Accretion Disks*,

«Astronomicheskii Zhurnal», 49, 1153, (1972). Trad. inglese in «Soviet Astronomy – AJ», 16, 941, (1973).

E.F. Taylor e J.A. Wheeler, *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity*, W. H. Freeman, San Francisco, 1992.

E. Teller, *The Work of Many People*, «Science», 121, 268, (1955).

S.A. Teukolsky, *Rotating Black Holes: Separable Wave Equations for Gravitational and Electromagnetic Perturbations*, «Physical Review Letters», 29, 1115, (1972).

K.S. Thorne, *Gravitational Collapse*, «Scientific American», 217, n. 5, 96, (1967).

K.S. Thorne, *Nonspherical Gravitational Collapse – A Short Review*, in *Magic without Magic: John Archibald Wheeler*, a cura di J.R. Klauder, W.H. Freeman, San Francisco, 1972, p. 231.

K.S. Thorne, *The Search for Black Holes*, «Scientific American», 231, n. 6, 32, (1974).

K.S. Thorne, *Gravitational Radiation*, in *300 Years of Gravitation*, a cura di S.W. Hawking and W. Israel, Cambridge University Press, Cambridge, 1987, p. 330.

K.S. Thorne, *An Americana Glimpses of Sakharov*, Priroda, maggio 1991; in russo. Traduzionie inglese in Drell e Kapitsa, a cura di, 1991, p. 74.

K.S. Thorne, *Closed Timelike Curves*, in *General Relativity and Gravitation 1992*, a cura di R.J. Gleiser, C.N. Kozameh, and D.M. Moreschi, Institute of Physics Publishing, Bristol, Inghilterra, 1993, p. 295.

K.S. Thorne, R.W.P. Drever, C.M. Caves, M. Zimmermann e V.D. Sandberg, *Quantum Nondemolition Measurements of Harmonic Oscillators*, Physical Review Letters, 40, 667, (1978).

K.S. Thorne, R.H. Price e D.A. Macdonald, a cura di, *Black Holes: The Membrane Paradigm*, Yale University Press, New Haven, Connecticut, 1986.

K.S. Thorne e W. Zurek, *John Archibald Wheeler: A Few Highlights of His Contributions to Physics*, Foundations of Physics, 16, 79, (1986).

K.S. Thorne e A.N. Zytkow, *Stars with Degenerate Neutron Cores. I. Structure of Equilibrium Models*, «Astrophysical Journal», 212, 832, (1977).

F.J. Tipler, *Causality Violation in Asymptotically Fiat Space-Times*, Physical Review Letters, 37, 879, (1976).

R.C. Tolman, *Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid*, Physical Review, 55, 364, (1939).

R.C. Tolman, Richard Chace Tolman Papers, archiviati presso il California Institute of Technology Archives 1948.

V. L. Trimble e K.S. Thorne, *Spectroscopic Binaries and Collapsed Stars*, «Astrophysical Journal», 56, 1013, (1969).

Uhuru, *Proceedings of the Uhuru Memorial Symposium: The Past, Present, and*

Future of X-Ray Astronomy, «Journal of the Washington Academy of Sciences», 71 n.1, 1981.

W.G. Unruh, *Notes on Black-Hole Evaporation*, «Physical Review D», 14, 870, (1976).

W.G. Unruh e R.M. Wald, *Acceleration Radiation and the Generalized Second Law of Thermodynamics*, «Physical Review D», 25, 942, (1982).

W.G. Unruh e R.M. Wald, *What Happens When an Accelerating Observer Detects a Rindler Particle*, «Physical Review D», 29, 1047, (1984).

USAEC (United States Atomic Energy Commission). *In the Matterof J. Robert Oppenheimer; Transcript of Hearing before Personnel Security Board, Washington, D.C., April 12, 1954, through May 6, 1954* (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.).

W.J. van Stockum, *The Gravitational Field of a Distribution of Particles Rotating about an Axis of Symmetry*, «Proceedings of the Royal Society of Edinburgh», 57, 135, (1937).

R.M. Wald, *The Back Reaction Effect in Particle Creation in Curved Space-time*, «Communications in Mathematical Physics», 54, 1, (1977).

R.M. Wald e U. Yurtsever, *General Proof of the Averaged Nuli Energy Condition for a Massless Scalar Field in Two-Dimensional Curved Space-time*, «Physical Review D», 44, 403, (1991).

K.C. Wali, *Chandra: A Biography of S. Chandrasekhar,* University of Chicago Press, Chicago, 1991.

Washington Conference on Radio Astronomy, Washington, 1954, «Journal of Geophysical Research», 59, 1-204, (1954).

J. Weber, *Amplification of Microwave Radiation by Substances Not in Thermal Equilibrium*, Transactions of the IEEE, PG Electron Devices 3, 1, giugno 1953.

J. Weber, *Detection and Generation of Gravitational Waves*, «Physical Review», 117, 306, (1960).

J. Weber, *General Relativity and Gravitational Waves*, Wiley-Interscience, New York, 1961.

J. Weber, Appunti di ricerca non pubblicati; documentati anche nel Diario personale di Robert Forward n. C1338, 13 settembre 1964, p. 66, non pubblicato.

J. Weber, *Evidence for Discovery of Gravitational Radiation*, «Physical Review Letters», 22, 1320, (1969).

R. Weiss, *Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna*, Quarterly Progress Report of the Research Laboratory of Electronics, M.I.T., 105, 54, (1972).

J.A. Wheeler, *Geons*, Physical Review, 97, 1955, 511. Ristampato in Wheeler, 1962, p. 131.

J.A. Wheeler, *On the Nature of Quantum Geometrodynamics*, «Annals of Physics», 2, 604, (1957).

J.A. Wheeler, *Neutrinos, Gravitation and Geometry*, in «Proceedings of the International School of Physics, Enrico Fermi, Course XI», Zanichelli, Bologna, 1960. Ristampato in Wheeler, 1962, p. 1.

J.A. Wheeler, *Geometrodynamics*, Academic Press, New York, 1962.

J.A. Wheeler, *The Superdense Star and the Criticai Nucleon Number*, in *Gravitation and Relativity*, a cura di H.Y. Chiu and W.F. Hoffman, Benjamin, New York, 1964a, p. 10.

J.A. Wheeler, *Geometrodynamics and the Issue of the Final State*, in *Relativity, Groups, and Topology*, a cura di C. DeWitt and B. S. DeWitt, Gordon and Breach, New York, 1964b, p. 315.

J.A. Wheeler, *Our Universe: The Known and the Unknown*, American Sdentisi, 56, 1968, 1.

J.A. Wheeler, *Some Men and Moments in the History of Nuclear Physics: The Interplay of Colleagues and Motivations*, in *Nuclear Physics in Retrospect*, a cura di Roger H. Stuewer, University of Minnesota, Minneapolis, 1979.

J.A. Wheeler, Lettera a K. S. Thorne del 3 dicembre 1985.

J.A. Wheeler, Appunti in cui Wheeler ha registrato il suo lavoro di ricerca e le sue idee mentre le andava elaborando; oggi archiviati presso la American Philosophical Society Library, Philadelphia, Pennsylvania, 1988.

J.A. Wheeler, *A Journey into Gravity and Spacetime*, «Scientific American» Library, New York, 1990.

F.L. Whipple e J. L. Greenstein, *On the Origin of Interstellar Radio Disturbances*, «Proceedings of the National Academy of Sciences», 23, 1937, 177.

T. H. White, *The Once and Future King*, Collins, Londra, 1939, capitolo 13 della Parte I, *The Sword in the Stone*.

C.M. Will, *Was Einstein Right?*, Basic Books, New York, 1986.

H. York, *The Advisors: Oppenheimer, Teller and the Superbomb*, W. H. Freeman, San Francisco, 1976.

Ya. B. Zel'dovich, *Semi-closed Worlds in the General Theory of Relativity*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 43, 1037, (1962). Traduzione inglese in «Soviet Physics – JETP», 16, 732, (1963).

Ya. B. Zel'dovich, *The Fate of a Star and the Evolution of Gravitational Energy upon Accretion*, «Doklady Akademii Nauk», 155, 67, (1964). Traduzione inglese in «Soviet Physics – Doklady», 9, 195, (1964).

Ya. B. Zel'dovich, *The Generation of Waves by a Rotating Body*, «Pis'ma v Redaktsiyu Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 14, 270, (1971). Traduzione inglese in «JETP Letters», 14, 180, (1971).

Ya. B. Zel'dovich, *Collected Works: Particles, Nuclei, and the Universe*, Nauka, Mosca, 1985; in russo. Traduzione inglese: *Selected Works of Yakov Borisovich*

Zel'dovich. Volume II: *Particles, Nuclei, and the Universe*, Princeton University Press, Princeton, 1993.

Ya. B. Zel'dovich e O. Kh. Guseinov, *Collapsed Stars in Binaries*, «Astrophysical Journal», 144, 840, (1965).

Ya. B. Zel'dovich e Yu. B. Khariton, *On the Issue of a Chain Reaction Based on an Isotope of Uranium*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 9, 1425, (1939); si vedano anche i successivi articoli degli stessi autori sulla stessa rivista, 10, 29, (1940) e 10, 477, (1940). Ristampati come i primi tre articoli nel Volume II delle opere di Zel'dovich, 1985.

Ya. B. Zel'dovich e I. D. Novikov, *Relativistic Astrophysics, Part I*, «Uspekhi Fizicheskikh Nauk», 84, 877, (1964). Traduzione inglese in «Soviet Physics – Uspekhi», 7, 763, (1965).

Ya. B. Zel'dovich e I. D. Novikov, *Relativistic Astrophysics, Part II*, «Uspekhi Fizicheskikh Nauk», 86, 447, (1965). Traduzione inglese in «Soviet Physics – Uspekhi», 8, 522, (1966).

Ya. B. Zel'dovich e A. A. Starobinsky, *Particle Production and Vacuum Polarization in an Anisotropie Gravitational Field*, «Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki», 61, 2161, (1971). Traduzione inglese in «Soviet Physics – JETP», 34, 1159, (1972).

R. Znajek, *The Electric and Magnetic Conductivity of a Kerr Hole*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 185, 833, (1978).

F. Zwicky, *Stellar Guests*, «Scientific Monthly», 40, 461, (1935).

F. Zwicky, *On the Theory and Observation of Highly Collapsed Stars*, «Physical Review», 55, 726, (1939).

INDICE ANALITICO*

* Le parti interessate da entrambi gli Indici sono il Prologo, i vari capitoli, l'Epilogo e le Note. Ulteriori informazioni su soggetti e persone nominati si trovano nella sezione dedicata ai Personaggi, nella Cronologia, nel Glossario e nella Bibliografia. Le lettere aggiunte ai numeri di pagina hanno il seguente significato: f = figura o fotografia, n = nota, N = nota di approfondimento, s = scheda. [610N64 significa «la nota relativa a p. 26, che si trova a p. 561»].

INDICE DEI NOMI

INDICE

Nel 1915 Einstein completò le leggi della relatività generale, segnando una svolta nella concezione dello spazio e del tempo. Si apriva così la nuova frontiera degli studi sul misterioso fenomeno astronomico dei buchi neri. In questo volume, Kip Thorne racconta le scoperte e le false piste della ricerca sull'argomento, da Einstein a Hawking, esamina le conseguenze della teoria dello spazio curvo e le possibilità offerte dalla fisica dei quanti, fino a prendere in esame l'ipotesi dei *wormholes*, ovvero le scorciatoie che permetterebbero di viaggiare da un punto all'altro dell'universo più velocemente della luce. Combinando principi fisici comprovati a geniali intuizioni, *Buchi neri e salti temporali* dimostra la sorprendente capacità della mente umana di sondare – tra sbalzi, vicoli ciechi e sforzi di comprensione – le complessità dell'universo e di rivelare l'intima semplicità, l'eleganza e la meravigliosa bellezza delle leggi fondamentali che lo governano. Questo libro non rappresenta soltanto il più importante testo di divulgazione sulla teoria dei buchi neri, ma una potente fonte di ispirazione dell'immaginario contemporaneo.

«Magistrale e intrigante»
THE WASHINGTON POST

«Un capolavoro della letteratura scientifica»
THE TIMES LITERARY SUPPLEMENT

«Un'avvincente fusione di teoria, storia e vicende umane»
THE WALL STREET JOURNAL

Kip Stephen Thorne
Professore di Fisica teorica al California Institute of Technology, è uno dei maggiori esperti di relatività generale e ha compiuto studi sui buchi neri, le stelle di neutroni, le onde gravitazionali e i gravitoni. È conosciuto soprattutto per le teorie riguardanti la possibilità di viaggiare nel tempo, per la «congettura del cerchio» sulla singolarità dei buchi neri e per gli studi sulla loro entropia. Nel 1984 ha fondato il progetto Ligo per la ricerca delle onde gravitazionali. È diventato celebre presso il grande pubblico per la sua consulenza scientifica al film *Interstellar*. Nel 2017 è stato insignito del Premio Nobel per la Fisica insieme a Barry C. Barish e Rainer Weiss. Il suo ultimo libro è *Viaggiare nello spaziotempo* (2018).

Progetto grafico di collana & cover layout: Bruno Apostoli

Kip Thorne

Buchi neri e salti temporali

BOOKS BOOKS BOOKS